



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Química e Ingeniería Química**

**Escuela Profesional de Química**

**Implementación de un programa de producción más  
limpia en una planta de reciclaje mecánico de residuos  
de post-consumo: envases pet - poli (tereftalato de  
etileno)**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Químico

**AUTOR**

David HUAYTALLA BELLIDO

**ASESOR**

Dr. Raymundo ERAZO ERAZO

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Huaytalla, D. (2019). *Implementación de un programa de producción más limpia en una planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases pet - poli (tereftalato de etileno)*. Tesis para optar el título profesional de Químico. Escuela Profesional de Química, Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

---

## **HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS**

**CODIGO ORCID DEL AUTOR:** No tengo

**CODIGO ORCID DEL ASESOR:** 0000-0003-1480-7641

**DNI del Autor:** 41906617

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:** No pertenece

**INSTITUCIÓN QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN:** Autofinanciado

**UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

Asociación de Propietarios Casa Huerta San Pedro, Mz. E, Lotes 14 y 15, distrito de Puente Piedra, COORDENADAS GEOGRAFICAS:\_COORDENADAS UTM S-10° 10"5.4444.

**AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:**

Enero 2018 hasta Abril 2018



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
**Universidad del Perú, Decana de América**  
Facultad de Química e Ingeniería Química  
Central: 6197000 anexo 1208

**“ Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad ”**

**ACTA DE TÍTULO POR TESIS**

Los suscritos Miembros del Jurado, nombrado por la Sra. Directora de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia de la **Dra. MERCEDES PUCA PACHECO**, el **Mg. JORGE EDUARDO LOAYZA PÉREZ** (Miembro), y el **Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO** (Asesor), después de escuchar la sustentación de la **TESIS**, titulada: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN UNA PLANTA DE RECICLAJE MECÁNICO DE RESIDUOS DE POST-CONSUMO: ENVASES PET-POLI ( TEREFTALATO DE ETILENO)**, rendido por el Bachiller en Ingeniería Química **DAVID HUAYTALLA BELLIDO**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO**. Acordaron calificarle con la **NOTA** de:

*Diecisiete*  
.....  
( LETRAS )

*17*  
.....  
( NÚMEROS )

Ciudad Universitaria, 24 de Mayo de 2019.

**Dra. MERCEDES PUCA PACHECO**  
PRESIDENTA

**Mg. JORGE EDUARDO LOAYZA PÉREZ**  
MIEMBRO REVISOR

**Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO**  
ASESOR

**Mg. JUANA SANDIVAR ROSAS**  
Directora de la Escuela Profesional  
de Ingeniería Química

## **DEDICATORIA**

A mi padre don Cayetano, que desde el cielo me guía;  
a mi madre doña Victoria, que siempre me motiva  
para ser un profesional competente;  
a mis hermanos: Alejandro, Ruth Jacobita y Eliseo Juan;  
a mi esposa María Aliane y a mi hijo Marco Antonio.

A mis familiares, amigos y  
compañeros de estudios universitarios  
que confiaron en mí, por su apoyo incondicional  
para culminar la presente tesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la vida cada día, a mis padres por su constante apoyo.

A mi asesor Dr. Ing. Raymundo Erazo Erazo por su valiosa colaboración en el desarrollo del presente trabajo de investigación; a los docentes de mi prestigiosa Alma Mater: UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS (UNMSM), por la formación académica y profesional durante mis estudios universitarios.

Al Mg. Ing. Jorge Eduardo Loayza Pérez por sus valiosas sugerencias en el desarrollo de la presente tesis.

A la Dra. Ing. Mercedes Puca Pacheco por sus exhaustivas observaciones en el desarrollo de la presente tesis.

Al Lic. Wilson Quispe Chamorro, Gerente General; y a la Lic. Gabriela Chacón Cisneros, Gerente Comercial; de la empresa Compañía Ecológica GW SAC, por su apoyo y colaboración.

Al Ing. David Víctor Zamudio Hinostroza por ser un visionario en el reciclaje mecánico de envases PET post-consumo en el Perú, y compartir experiencias en el diseño de plantas de reciclaje.

A la Lic. Marialena Deyanex Manrique Figueroa por su colaboración en la gestión empresarial eficiente de plantas de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.

Finalmente, a todas las personas que de manera directa e indirecta colaboraron con el desarrollo de la presente tesis.

## RESUMEN

La presente tesis tiene el objetivo de implementar un programa de Producción Más Limpia en una planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), de la empresa Compañía Ecológica GW SAC, que consiga la mejora productiva y ambiental; la cual produce 300 TM/mes de hojuelas de PET reciclado.

El desarrollo de la tesis sigue la metodología que plantea la “*Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia*”.

Se han generado 4 oportunidades de Producción Más Limpia (PML), y requieren de un plazo de 5 meses para su implementación, y se conseguirá un impacto positivo en los aspectos técnico, económico y ambiental; tales como: ahorro económico de 9.5% con la sustitución de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable; en lo que respecta a sustitución de combustible y cambio de tecnología, de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), ahorro económico de 10.8%; con la reutilización del agua de enjuague en las tinas de flotación, reducción de consumo de agua de 35.5%; en lo que respecta al cambio de tamiz de las centrifugadoras de 2.0 mm a 1.5 mm de diámetro de orificios, reducción en la generación de residuo sólido como sedimento de 5.9%.

Finalmente, la inversión total para la implementación del programa de PML asciende a S/ 22 979.00 (soles) incluido IGV, la cual será financiada por la misma empresa; presenta un período de recuperación de la inversión de 10 meses y se espera generar una rentabilidad de S/ 22 316.00 (soles) incluido IGV, en el primer año.

**Palabras clave:** Producción Más Limpia (PML), reciclaje mecánico, residuos de post-consumo, Poli(Tereftalato de Etileno) - PET.



## ABSTRACT

This thesis aims to implement a Cleaner Production programme in a mechanical recycling plant for post-consumer waste: PET bottle – Poly(Ethylene Terephthalate), of the enterprise Compañía Ecológica GW SAC, to get productivity and environmental improvements, which produces 300 metric tons per month of recycled PET flakes.

The development of the thesis follows the methodology that raises the *“Peruvian Guide GP 900.200:2007 – Guide to the implementation of Cleaner Production”*.

There have been generated 4 Cleaner Production (CP) opportunities, and need of a term of 5 months for its implementation, and a positive impact will be achieved in the technical, economic and environmental aspects; such as: economic saving of 9.5% with the replacement of powder detergent to biodegradable liquid detergent, with regard to the substitution of fuel and the change of technology, of mineral coal (anthracite) to Liquefied Petroleum Gas (LPG), economic saving of 10.8%; with the reuse of rinsing water in flotation tanks, reduction of water consumption of 35.5%; with regard to the sieve change of centrifuges from 2.0 mm to 1.5 mm diameter of orifices, reduction in the generation of solid waste as sediment of 5.9%.

Finally, the total investment for the implementation of the CP programme amounts to S/ 22, 979.00 (Soles) including IGV, which will be financed by the same enterprise; it presents a period of recovery of the investment of 10 months and is expected to generate a profitability of S/ 22, 316.00 (Soles) including IGV, in the first year.

**Keywords:** Cleaner Production (CP), mechanical recycling, post-consumer waste, Poly(Ethylene Terephthalate) - PET.

## CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
GLOSARIO.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>2</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1 Problema General.....	3
1.2.2 Problemas Específicos.....	3
1.3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.4.1 Objetivo General.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9
1.5 HIPÓTESIS.....	10
1.5.1 Hipótesis General.....	10
1.5.2 Hipótesis Específicas.....	10
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
2.1 POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) - PET.....	11
2.1.1 Química y síntesis del PET.....	12
2.1.2 Características y propiedades del PET.....	14
2.1.3 Usos y aplicaciones del PET.....	16
2.2 RECICLAJE DEL PET.....	18
2.2.1 Reciclaje mecánico del PET.....	18
2.2.2 Reciclaje químico del PET.....	20

2.2.3	Valorización energética del PET.....	22
2.2.4	Reciclaje de envases PET post-consumo en el Perú.....	23
2.2.5	Reciclaje de envases PET post-consumo a nivel mundial.....	24
2.3	RECICLAJE DE PLÁSTICOS.....	26
2.3.1	Clasificación de los plásticos.....	26
2.3.2	Codificación de los plásticos.....	27
2.4	PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA (PML).....	29
2.4.1	Principios de Producción Más Limpia.....	29
2.4.2	Herramientas de Producción Más Limpia.....	31
2.4.3	Beneficios de implementar un programa de Producción Más Limpia.....	32
2.4.4	Estrategias de Producción Más Limpia.....	33
2.4.5	Barreras para la aplicación de Producción Más Limpia.....	34
2.5	MARCO LEGAL APLICABLE EN LA INDUSTRIA DEL RECICLAJE DE ENVASES PET POST-CONSUMO.....	36
2.5.1	Ley N° 28611 – Ley General del Ambiente (2005).....	36
2.5.2	Decreto Legislativo N° 1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (MINAM - 2016).....	38
2.5.3	Decreto Supremo N° 001-2015-VIVIENDA – Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario (2015)....	40
2.5.4	Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire (MINAM - 2017).....	43
2.5.5	Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (MINAM - 2017).....	45
2.5.6	Decreto Supremo N° 085-2003-PCM – Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Ruido (2003).....	47
2.5.7	Decreto Supremo N° 005-2012-TR – Reglamento de la Ley N° 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo (MTPE - 2012).....	49
2.6	LA EMPRESA: COMPAÑÍA ECOLÓGICA GW SAC.....	52
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....</b>		<b>53</b>

3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	53
3.1.1	Investigación Descriptiva.....	53
3.2	RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	54
3.2.1	Fuentes de Información Primaria y Secundaria.....	54
3.3	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	54
3.4	METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.....	54
3.4.1	Primera Etapa: Planeamiento y organización.....	55
3.4.2	Segunda Etapa: Diagnóstico de Producción Más Limpia.....	55
3.4.3	Tercera Etapa: Estudio de Factibilidad.....	56
3.4.4	Cuarta Etapa: Implementación y seguimiento de las oportunidades de Producción Más Limpia.....	56
3.4.5	Quinta Etapa: Mejora Continua .....	56
 <b>CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROGRAMA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.....58</b>		
4.1	PRIMERA ETAPA: PLANEAMIENTO Y ORGANIZACIÓN.....	58
4.1.1	Compromiso del Directorio.....	58
4.1.2	Comité de Producción Más Limpia.....	58
4.1.3	Objetivos generales.....	59
4.1.4	Cronograma de actividades para implementar el programa de Producción Más Limpia.....	59
4.1.5	Limitaciones para la implementación del programa de Producción Más Limpia y sus alternativas de solución.....	61
4.2	SEGUNDA ETAPA: DIAGNÓSTICO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.....	62
4.2.1	Mapa de Procesos.....	62
4.2.2	Descripción del Proceso.....	64
4.2.2.1	Línea de Molienda de envases PET post-consumo.....	65
4.2.2.2	Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	68
4.2.2.3	Línea de Lavado de hojuelas de PP/PEBD reciclado....	75
4.2.2.4	Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales.....	80
4.2.3	Diagramas de Flujo.....	82
4.2.4	Balances de Materia y Energía.....	87

4.2.5	Identificación de las causas de los flujos de contaminantes y de las ineficiencias.....	103
4.2.6	Oportunidades de Producción Más Limpia.....	108
4.2.7	Pre-selección de las oportunidades de Producción Más Limpia.....	110
4.3	TERCERA ETAPA: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD.....	112
4.3.1	Evaluación Técnica.....	112
4.3.2	Evaluación Económica.....	117
4.3.3	Evaluación Ambiental.....	120
4.3.4	Selección de Oportunidades Factibles.....	122
4.4	CUARTA ETAPA: IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS OPORTUNIDADES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.....	123
4.4.1	Obtención de Fondos.....	123
4.4.2	Implementación de las oportunidades factibles de Producción Más Limpia: Plan de acción.....	123
4.4.3	Supervisión y Evaluación del avance.....	125
4.5	QUINTA ETAPA: MEJORA CONTINUA.....	127
4.5.1	Mantenimiento de las actividades de Producción Más Limpia...	127
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>128</b>
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....</b>		<b>131</b>
<b>CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES.....</b>		<b>133</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>134</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>141</b>
Anexo A.....		141
Anexo B.....		143
Anexo C.....		144
Anexo D.....		145
Anexo E.....		147
Anexo F.....		147
Anexo G.....		148

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1:</b> Propiedades físicas del Poli(Tereftalato de Etileno) - PET.....	16
<b>Tabla 2.2:</b> Empresas en el Perú fabricantes de productos de mayor valor agregado a partir de PET reciclado.....	24
<b>Tabla 2.3:</b> Códigos de identificación de los plásticos reciclables.....	28
<b>Tabla 2.4:</b> Valores Máximos Admisibles (VMA) para descargas al sistema de alcantarillado sanitario.....	42
<b>Tabla 2.5:</b> Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire.....	44
<b>Tabla 2.6:</b> Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.....	46
<b>Tabla 2.7:</b> Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido.....	48
<b>Tabla 4.1:</b> Cronograma de actividades para implementar el programa de Producción Más Limpia.....	60
<b>Tabla 4.2:</b> Composición promedio de los envases PET post-consumo.....	87
<b>Tabla 4.3:</b> Clasificación de los envases PET post-consumo.....	88
<b>Tabla 4.4:</b> Composición promedio de los envases PET post-consumo de aceite.....	88
<b>Tabla 4.5:</b> Resultados del balance de materia del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	92
<b>Tabla 4.6:</b> Resultados del balance de materia del Proceso de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	93
<b>Tabla 4.7:</b> Resultados del balance de materia del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	94
<b>Tabla 4.8:</b> Consumo de energía por operaciones unitarias del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo (PET cristal).....	96
<b>Tabla 4.9:</b> Resultados del balance de energía del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	97
<b>Tabla 4.10:</b> Resultados del balance de energía del Proceso de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	98

<b>Tabla 4.11:</b> Resultados del balance de energía del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	102
<b>Tabla 4.12:</b> Generación de sedimento en el Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	103
<b>Tabla 4.13:</b> Generación de aguas residuales del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	104
<b>Tabla 4.14:</b> Generación de cenizas y emisiones en el Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	105
<b>Tabla 4.15:</b> Valores Máximos Admisibles (VMA) para efluente después de tratamiento primario descargado al alcantarillado sanitario.....	106
<b>Tabla 4.16:</b> Pre-selección de las oportunidades de Producción Más Limpia por el método de la suma ponderada.....	111
<b>Tabla 4.17:</b> Evaluación Técnica de Oportunidad N°1 de PML.....	113
<b>Tabla 4.18:</b> Evaluación Técnica de Oportunidad N°2 de PML.....	114
<b>Tabla 4.19:</b> Evaluación Técnica de Oportunidad N°3 de PML.....	115
<b>Tabla 4.20:</b> Evaluación Técnica de Oportunidad N°4 de PML.....	116
<b>Tabla 4.21:</b> Evaluación Económica de Oportunidad N°1 de PML.....	117
<b>Tabla 4.22:</b> Evaluación Económica de Oportunidad N°2 de PML.....	118
<b>Tabla 4.23:</b> Evaluación Económica de Oportunidad N°3 de PML.....	119
<b>Tabla 4.24:</b> Evaluación Económica de Oportunidad N°4 de PML.....	120
<b>Tabla 4.25:</b> Resultados de la evaluación ambiental de las oportunidades de PML.....	121
<b>Tabla 4.26:</b> Resultados del estudio de factibilidad de las oportunidades de PML.....	122
<b>Tabla 4.27:</b> Plan de acción para la implementación de las oportunidades factibles de Producción Más Limpia.....	124
<b>Tabla 4.28:</b> Mejora de indicadores de desempeño con la implementación del programa de Producción Más Limpia .....	126

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Fórmula Química del PET.....	11
<b>Figura 2.2:</b> Síntesis del Poli(Tereftalato de Etileno) - PET.....	13
<b>Figura 2.3:</b> Reacciones de Esterificación y Policondensación para la síntesis del PET.....	14
<b>Figura 2.4:</b> Tasas de reciclaje de envases PET post-consumo a nivel mundial.....	25
<b>Figura 3.1:</b> Etapas de la implementación de Producción Más Limpia.....	57
<b>Figura 4.1:</b> Mapa de Procesos de la empresa Compañía Ecológica GW SAC.....	63
<b>Figura 4.2:</b> Envases PET post-consumo a granel y prensado.....	64
<b>Figura 4.3:</b> Envases PET post-consumo seleccionados por color.....	65
<b>Figura 4.4:</b> Separador Trommel para envases PET post-consumo.....	66
<b>Figura 4.5:</b> Molino de cuchillas.....	67
<b>Figura 4.6:</b> Muestra de hojuelas sucias de PET reciclado.....	67
<b>Figura 4.7:</b> Sistema de cascada para prelavado.....	68
<b>Figura 4.8:</b> Tina de flotación.....	69
<b>Figura 4.9:</b> Tanque de lavado en caliente.....	70
<b>Figura 4.10:</b> Centrifugadora de enjuague.....	71
<b>Figura 4.11:</b> Tina de enjuague.....	72
<b>Figura 4.12:</b> Muestras de impurezas escogidas antes de la remolienda.....	73
<b>Figura 4.13:</b> Molino de cuchillas en etapa de afilado.....	74
<b>Figura 4.14:</b> Muestras de hojuelas de PET reciclado (rPET).....	75
<b>Figura 4.15:</b> Tina de flotación con paletas-rodillos.....	76
<b>Figura 4.16:</b> Centrifugadora de secado.....	77
<b>Figura 4.17:</b> Secador de aire caliente.....	78
<b>Figura 4.18:</b> Separador de etiquetas.....	79
<b>Figura 4.19:</b> Muestras de hojuelas de PP y PEBD reciclados.....	80
<b>Figura 4.20:</b> Trampa de finos y lodos.....	81



<b>Figura 4.21:</b> Diagrama de bloques del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	83
<b>Figura 4.22:</b> Diagrama de bloques del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	84
<b>Figura 4.23:</b> Diagrama de flujo del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	85
<b>Figura 4.24:</b> Diagrama de flujo del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.....	86
<b>Figura 4.25:</b> Diagrama de flujo de materiales y energía del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.....	90
<b>Figura 4.26:</b> Esquema de la operación de Lavado en Caliente de hojuelas de PET reciclado.....	99

## GLOSARIO

Para efectos de interpretación de la presente tesis, se relacionan los siguientes términos que hacen parte integral del mismo; que han sido adaptados de la “*Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia*”:

1. “**Actividades:** Agrupación de tareas que hacen parte de un proceso”.
2. “**Contaminación:** Es un cambio desfavorable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, del agua o del suelo, que es o podría ser perjudicial para la vida humana, para la de aquellas especies deseables, para nuestros procesos industriales, para nuestras condiciones de vivienda o para nuestros recursos culturales; o que desperdicie o deteriore recursos que son utilizados como materias primas”.
3. “**Desarrollo sostenible:** Se define como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.
4. “**Desempeño ambiental:** Resultados medibles de la gestión que hace una organización sobre sus aspectos ambientales”.
5. “**Ecoeficiencia:** Producción de bienes y servicios a niveles competitivos a la par de una reducción sistemática del consumo de recursos y de la generación de contaminantes”.
6. “**Estándar de Calidad Ambiental (ECA):** Es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, en el aire, agua o suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni del ambiente”.
7. “**Estrategia ambiental:** Es la definición del proceso de orientación general, basados en políticas, planes y programas dentro de un marco de desarrollo sostenible, donde deben operar las acciones e instrumentos a fin de conseguir objetivos previamente formulados”.

**8. “Impacto ambiental:** Cualquier cambio en el medio ambiente, ya sea adverso o beneficioso, total o parcialmente resultante de las actividades, productos o servicios de una organización”.

**9. “Límite Máximo Permisible (LMP):** Es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente”.

**10. “Mejor tecnología disponible (Best Available Technology - BAT):** Son los medios más eficaces y avanzados para el desarrollo de las actividades productivas y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límites de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea aplicable, reducir en general las emisiones y el impacto ambiental”.

**11. “Operación unitaria:** Aquella de naturaleza física donde no ocurren reacciones químicas. Este tipo de operación es común a todas las industrias de proceso. Las operaciones unitarias estudian principalmente la transferencia y los cambios de energía, transferencias y cambios de materiales que se llevan a cabo por medios físicos, pero también por medios fisicoquímicos”.

**12. “Organización:** Compañía, corporación, firma, empresa, autoridad o institución, o parte o combinación de ellas, sean o no sociedades, públicas o privadas, que tiene sus propias funciones y administración”.

**13. “Proceso unitario:** Procedimiento de fabricación en los cuales se producen reacciones químicas. En los procesos unitarios los balances de materia se usan para determinar las composiciones y los pesos de las corrientes o para determinar el grado de conversión alcanzado en una reacción”.

**14. “Producción Más Limpia (PML):** Es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada para los procesos, productos y servicios con el objetivo de incrementar la eficiencia integral de la organización y reducir los riesgos sobre la población humana y el ambiente. Puede ser aplicada a los procesos utilizados en cualquier industria, para productos y servicios diversos brindados dentro de la sociedad”.

**15. “Programa de Producción Más Limpia:** Conjunto de acciones específicas, ordenadas secuencialmente en el tiempo, que conducen a la eficiencia integral de la organización y a la reducción de los riesgos sobre la población humana y el ambiente, mediante el análisis de los procesos, para definir, evaluar, seleccionar e implantar medidas efectivas”.

**16. “Reciclaje:** Actividad que permite aprovechar un residuo mediante un proceso de transformación; en este caso, envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno) post-consumo, para acondicionarlos con el propósito de integrarlos nuevamente a un ciclo productivo como materia prima, que de otra manera podría ser desechado”.

**17. “Residuos de post-consumo:** Son aquellos que se caracterizan por un alto volumen de generación, derivado de la actividad de consumo masivo, lo que responsabiliza al fabricante de asumir su residuo y al generador de hacer entrega de éstos. En este caso, envases PET post-consumo”.

**18. “Sistema de Gestión Ambiental (SGA):** Parte del sistema de gestión global usada para gestionar aspectos ambientales, cumplir los requisitos legales y otros requisitos, y abordar los riesgos y oportunidades”.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la prevención de la contaminación ambiental y la eficiencia en los procesos productivos son factores primordiales para determinar la competitividad de una empresa; es así que surge la estrategia de Producción Más Limpia.

La Producción Más Limpia (PML) ha tenido gran aprobación en el sector empresarial: industrias textiles, industrias de harina y aceite de pescado, industrias de metalmecánica, etc. por representar un planteamiento económicamente más eficiente y sostenible para minimizar el impacto ambiental de sus procesos.

En este caso de estudio, la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), de la empresa Compañía Ecológica GW SAC; que a su vez genera residuos y desechos contaminantes en su procesos productivos; para una gestión eficiente de sus procesos se propone la implementación del programa de Producción Más Limpia, la cual está enfocada a mejorar la competitividad y productividad en la empresa, reduciendo la generación de residuos, efluentes y emisiones; para la conservación del medio ambiente, además de generar rentabilidad por un mejor aprovechamiento de los recursos en la empresa.

En este sentido, en el Capítulo I; se trata el Planteamiento del Problema, en el Capítulo II; se establece el Marco Teórico, en el Capítulo III; se plantea la Metodología usada en la investigación, en el Capítulo IV; se muestra el Desarrollo del programa de Producción Más Limpia, donde se describe el proceso productivo actual, para luego generar oportunidades de PML, en el Capítulo V; Resultados y Discusión, se analiza el programa de PML, en los Capítulos VI y VII; se realizan las Conclusiones y Recomendaciones; respectivamente. Finalmente, se cita la Bibliografía y se adjuntan Anexos, utilizados para el desarrollo de la presente tesis.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La industria del reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno) en el desarrollo de sus actividades generan residuos, emisiones y efluentes; que al no ser gestionadas eficientemente pueden afectar la productividad y competitividad de la empresa dedicada a este rubro.

Ante este panorama, en la empresa Compañía Ecológica GW SAC, que tiene una capacidad de producción de 300 TM/mes de hojuelas de PET reciclado para las industrias de fibra de poliéster, empaques termoformados y resina tereftálica; ya tiene 3 años en el negocio del reciclaje de envases PET post-consumo, se presentan los siguientes escenarios:

- Se continúa empleando carbón mineral (antracita) en el horno para el calentamiento del tanque de lavado, en la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado, el cual genera impacto ambiental negativo debido a sus emisiones y residuos.
- Se realiza un uso irracional del agua en el proceso productivo al no emplear técnicas de recirculación o reutilización.
- Falta de motivación y conciencia ambiental en el desempeño del personal de la empresa.

Por tal motivo, se ha visto la necesidad de mejorar el proceso productivo y reducir la contaminación ambiental que la empresa genera, implementando *Producción Más Limpia (PML)*, que “es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada para los procesos, productos y servicios con el objetivo de incrementar la eficiencia integral de la empresa y reducir los riesgos sobre la población humana y

*el ambiente. Puede ser aplicada a los procesos utilizados en cualquier industria, para productos y servicios diversos brindados dentro de la sociedad”.*

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

A partir de la búsqueda de un proceso de mejora en los procesos productivos de la empresa, surgen las siguientes interrogantes:

### **1.2.1 Problema General**

¿Será viable la implementación de un programa de Producción Más Limpia en la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno) que consiga la mejora productiva y ambiental de la empresa Compañía Ecológica GW SAC?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

- ¿Se podrán utilizar las herramientas de Producción Más Limpia para definir la situación ambiental y económica del proceso productivo de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo?
- ¿Con la generación de oportunidades de Producción Más Limpia se conseguirán la mejora productiva y ambiental de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, reduciendo la generación de residuos, efluentes y emisiones?
- ¿Serán posibles la evaluación de la factibilidad técnica, económica y ambiental de las oportunidades de Producción Más Limpia propuestas para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo?
- ¿Cómo se podría determinar la utilidad económica del programa de Producción Más Limpia para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo?

### 1.3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En la búsqueda de material bibliográfico se encontró el siguiente trabajo de:

A) Toledo Quintana, Diether. (2013). “**Aplicación de un programa de Producción Más Limpia en la empresa recicladora de PET del Grupo Pradera SAC**”, el cual guarda relación con el presente trabajo de tesis; la capacidad de producción es de 40 TM/mes de hojuelas de PET reciclado, donde se concluye lo siguiente:

- Ahorro energético y mejora de la calidad ambiental por cambio de combustible en la operación de lavado en caliente; se utilizará Gas Licuado de Petróleo (GLP) en vez de briquetas de carbón mineral (antracita).
- Ahorro en insumos de lavado y mejora en la calidad de los efluentes por la instalación de un sistema cascada de prelavado en la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.
- Mejora en el desempeño laboral en la selección de envases PET post-consumo por la instalación de una faja transportadora de selección antes de la operación de molienda [1].

Además, se han encontrado trabajos relacionados a Producción Más Limpia aplicados en la industria textil, industria de harina y aceite de pescado, industria metal-mecánica y otros; que contribuirán al desarrollo de la tesis planteada.

B) Flores Galarza, Jhony D. (2015). “**Implementación del programa de Producción Más Limpia en una planta de teñido y engomado de urdimbre Denim**”, donde se concluye lo siguiente:

- Las opciones de Producción Más Limpia evaluadas dan a la empresa una mejor ventaja competitiva, debido a los ahorros obtenidos y a la mejora de la calidad de las telas e índices de producción a menor costo.



- Este trabajo será considerado como el punto de partida para la implementación de la PML en todas las áreas de la empresa.
- El cuidado ambiental será una inversión con un corto período de recuperación, y la imagen de la empresa conseguirá mejora ante las autoridades ambientales y los trabajadores [2].

C) Paredes Concepción, Perla. (2014). “**Producción Más Limpia y el manejo de efluentes en plantas de harina y aceite de pescado**”, donde se concluye lo siguiente:

- Considerando a los efluentes; el principal agente contaminante del medio marino, es una necesidad que los productores de harina y aceite de pescado comiencen un cambio hacia procesos de Producción Más Limpia aplicando tecnologías limpias que consigan el cumplimiento de las normas legales, mejora del desempeño ambiental y la eficiencia de sus procesos mediante la incorporación de sólidos recuperados en el proceso productivo principal, así como la mejora de su imagen ante la comunidad, facilitando el ingreso a mercados internacionales.
- La implementación de tecnologías limpias en el sector de producción de harina y aceite de pescado viene llevándose progresivamente con la adecuación y reemplazo de equipos e instalación de nuevas operaciones en el proceso productivo principal con la finalidad de disminuir el efecto contaminante de las emisiones y material particulado, residuos sólidos y los efluentes descargados al medio ambiente [3].

D) Guerra Huamán, H., & Saire Guerra, M. (2014). “**Elaboración de un programa de Producción Más Limpia para la planta de conservas de recursos hidrobiológicos de Pacific Natural Foods SAC**”, donde se concluye lo siguiente:

- Instalación en todas las mangueras de la planta, de toberas de pulverización y válvulas de regulación, que se emplean en la limpieza de las instalaciones del proceso productivo.

- Reutilización del agua de enfriamiento de las latas en la autoclave.
- Cambio de tecnología y combustible en el área de caldera para utilizar Gas Licuado de Petróleo (GLP) o Gas Natural (GN) en reemplazo de Petróleo Residual 500.
- Instalación de un economizador de energía en la caldera [4].

E) Mucching Vidal, Glenney N. (2013). “**Aplicación de un programa de implementación de Producción Más Limpia en el proceso de pintado en una empresa metalmecánica peruana**”, donde se concluye lo siguiente:

- Implementación de un programa de capacitación en temas de Producción Más Limpia.
- Planteamiento de oportunidades de reutilización y reciclaje para reducir el impacto ambiental negativo.
- Renovación de maquinarias y equipos debido a la ineficiencia de los mismos por tiempo de uso [5].

F) Carrasco Pazos, R., & Marticorena Cerrón, L. (2012). “**Mejora de los procesos aplicando las herramientas de Producción Más Limpia en una refinería de sal**”, donde se concluye lo siguiente:

- Establecimiento de especificaciones de control de proceso para la regulación de los flujos y concentraciones de salmuera de lavado.
- Cambio de matriz energética, de Diesel B2 a Gas Natural (GN).
- Repotenciación del secador rotatorio para la reducción de consumo específico de combustible.
- Implementación de gestión en la reutilización de los polvos finos de sal para la renovación de suelos contaminados.
- Instalación de un tamiz antes de la molienda secundaria para evitar remolido.

- Implementación de un programa de gestión integral de residuos sólidos aprovechando la comercialización de los residuos reusables (aceite usado, plástico, vidrio, papel, etc.) [6].

G) Ricaldi Marcelo, Rolando A. (2011). “**Identificación de mecanismos de Producción Más Limpia (PML) en el Centro de Beneficio Municipal de ganado en la provincia de Junín para mejorar las condiciones de calidad y medioambiente**”, donde se concluye lo siguiente:

- Aplicación de un programa de ahorro y monitoreo de agua.
- Capacitación al personal de la empresa en temas de Producción Más Limpia.
- Las mejores alternativas de reaprovechamiento de los residuos generados en los procesos productivos son: el compostaje y la elaboración de jabón [7].

Como se detallan en los trabajos anteriores relacionados a Producción Más Limpia, se consiguen resultados favorables en la mejora de la competitividad de las empresas y un mejor desempeño ambiental, por tal motivo la presente tesis: “**Implementación de un programa de Producción Más Limpia en una planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno)**” realizada en la empresa Compañía Ecológica GW SAC, tiene la necesidad de desarrollarse porque la empresa requiere mejorar sus procesos productivos y reducir la contaminación ambiental que genera, para conseguir la competitividad y adecuarse a la legislación ambiental vigente, además de conseguir un incremento en su rentabilidad. Para tal finalidad se detalla la justificación de la investigación:

#### - **Justificación teórica**

La investigación propuesta busca implementar un programa de Producción Más Limpia (PML), para mejorar la productividad y el desempeño ambiental, obteniendo resultados favorables en la planta

de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo; siguiendo la metodología que plantea la “*Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia*”.

- **Justificación técnica**

Con la implementación de un programa de Producción Más Limpia (PML) se pretende obtener un mejoramiento de la competitividad en la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, aplicando estrategias de PML tales como:

- ✓ Buenas prácticas de operación en el proceso.
- ✓ Mejor control de los procesos.
- ✓ Reutilización, recuperación y reciclaje in situ.
- ✓ Producción de subproductos útiles.
- ✓ Sustitución de insumos.
- ✓ Modificación de equipos.
- ✓ Cambio de tecnología.

- **Justificación ambiental**

La implementación del programa de PML en la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, busca conseguir una adecuación a la legislación ambiental vigente, y posteriormente crear un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) en la empresa.

- **Justificación social**

La propuesta de implementación del programa de PML en la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, en el aspecto social; busca beneficiar a la empresa en: acceso a nuevos mercados, generación de efectos positivos en el personal, mejora de las condiciones de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST), mejora de las relaciones con la comunidad y la autoridad.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Implementar un programa de Producción Más Limpia en una planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), de la empresa Compañía Ecológica GW SAC, que consiga la mejora productiva y ambiental.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Utilizar las herramientas de Producción Más Limpia para definir la situación ambiental y económica del proceso productivo de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.
- Generar oportunidades de Producción Más Limpia para la mejora productiva y ambiental de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, reduciendo la generación de residuos, efluentes y emisiones.
- Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de las oportunidades de Producción Más Limpia propuestas para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.
- Determinar los costos y beneficios previstos para la implementación del programa de Producción Más Limpia.

## **1.5 HIPÓTESIS**

### **1.5.1 Hipótesis General**

La implementación de un programa de Producción Más Limpia en la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), contribuirá en la mejora productiva y ambiental de la empresa Compañía Ecológica GW SAC.

### **1.5.2 Hipótesis Específicas**

- El empleo de las herramientas de Producción Más Limpia permitirá definir la situación ambiental y económica del proceso productivo de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.
- La generación de oportunidades de Producción Más Limpia conseguirá la mejora productiva y ambiental de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, reduciendo la generación de residuos, efluentes y emisiones.
- La evaluación de la factibilidad técnica, económica y ambiental de las oportunidades de Producción Más Limpia propuestas para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo determinará la implementación del programa de Producción Más Limpia.
- La determinación de los costos y beneficios previstos para la implementación del programa de Producción Más Limpia definirá la rentabilidad del proyecto para la empresa.

## CAPÍTULO II

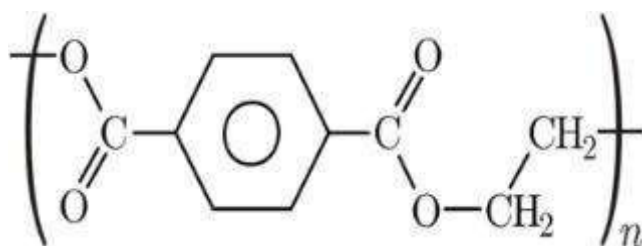
### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) - PET

Sobre el particular, el Poli(Tereftalato de Etileno), Polietileno Tereftalato o Tereftalato de Polietileno; “es un polímero de condensación, perteneciente a la familia de los poliésteres. Conocido comercialmente como PET, empleado en la fabricación de envases para diversos usos y en la producción de fibras, en función de su estructura cristalina” [8].

“Patentado en 1941 por *J.R. Whinfield* y *J.T. Dickinson* como un polímero para fibra, la fabricación de PET ha alcanzado un continuo desarrollo tecnológico desde que comenzó su producción comercial como fibra de poliéster en 1955, logrando altos estándares de calidad y presentando una amplia variedad de aplicaciones” [8].

La fórmula química correspondiente al Poli(Tereftalato de Etileno) - PET se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1: Fórmula Química del PET**

Fuente: Ciencia de los polímeros [9].

“La propiedad más distintiva es la barrera de gases que ofrece, que le confirió gran difusión como envase de bebidas carbonatadas (gasificadas), sifones y posteriormente otros productos como aceites, mayonesas, cosméticos, etc” [8].

Su escaso peso en relación al del producto adquirido, aproximadamente 50 veces menos que el líquido contenido y fundamentalmente la seguridad de los usuarios, ante una eventual rotura, fueron factores determinantes para la generalización de su uso.

“Analizado desde un enfoque ambiental, es la resina que presenta mayores aptitudes para el reciclado, ostentando el número 1 rodeado de tres flechas formando un triángulo, en la base del envase. El principal destino de esta materia prima post-consumo es la fabricación de fibras textiles, utilizándose en la confección de alfombras, cuerdas, cepillos y escobas, sunchos, telas para prendas de vestir como el "polar", calzados, camisetas, etc” [8].

“Esta resina presenta otra ventaja ambiental, la cual es la reducción drástica de la energía utilizada en el transporte, la simpleza de procedimientos y las relativamente bajas temperaturas ( $250^{\circ}\text{C} < \text{PET} < 300^{\circ}\text{C}$ ) a las cuales debe ser sometido el PET para ser transformado en nuevos productos, también reciclables” [8].

### **2.1.1 Química y síntesis del PET**

Al respecto, se puede partir de dos productos intermedios distintos, provenientes de la industria petroquímica; para la síntesis del PET a escala industrial:

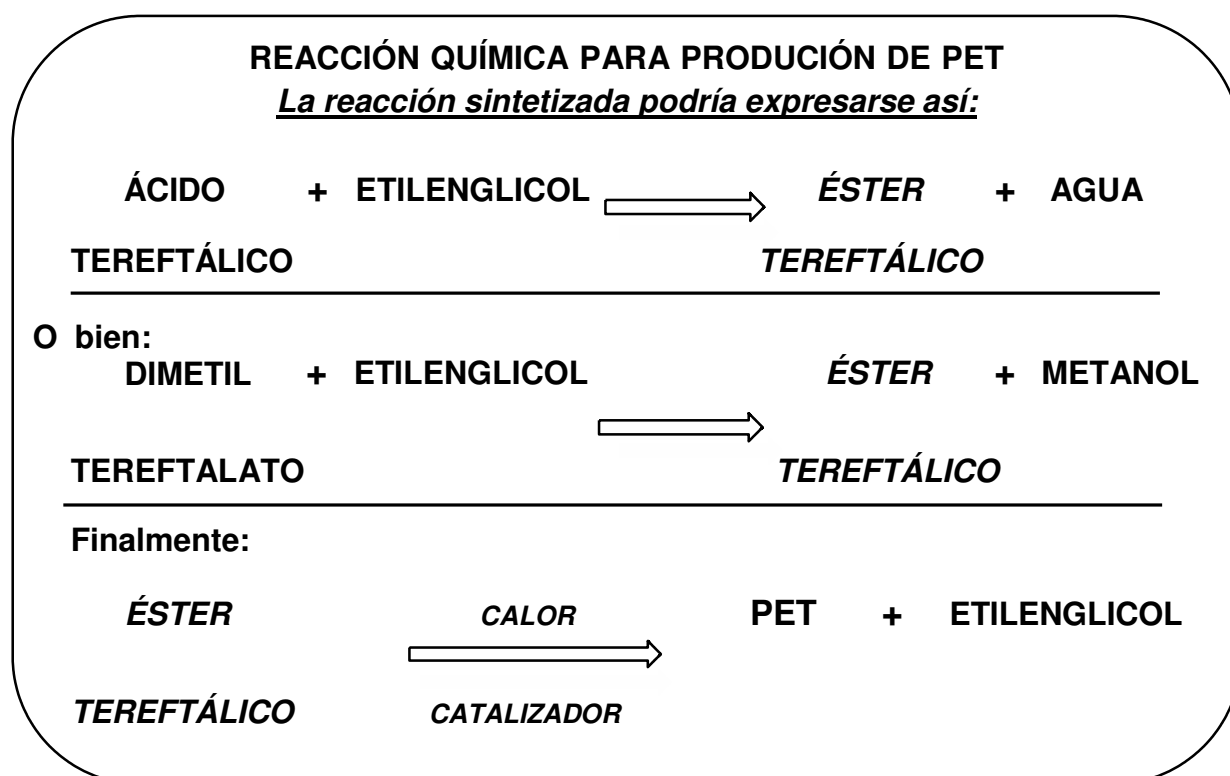
- Ácido Tereftálico – TPA
- Dimetiltereftalato – DMT

Luego, “mediante la reacción de esterificación la cual consiste en la eliminación de agua en el proceso de TPA con etilenglicol, y eliminación de metanol en el proceso de DMT con etilenglicol; se obtiene el monómero *tereftalato de bis(2-hidroxietil)*, seguidamente se pasa a la fase de policondensación (Figura 2.2 y 2.3), la que se realiza mediante catalizadores tales como acetato de zinc, magnesio o cobalto; y a elevadas temperaturas arriba de  $270^{\circ}\text{C}$ , consiguiéndose así la polimerización de la resina PET”.



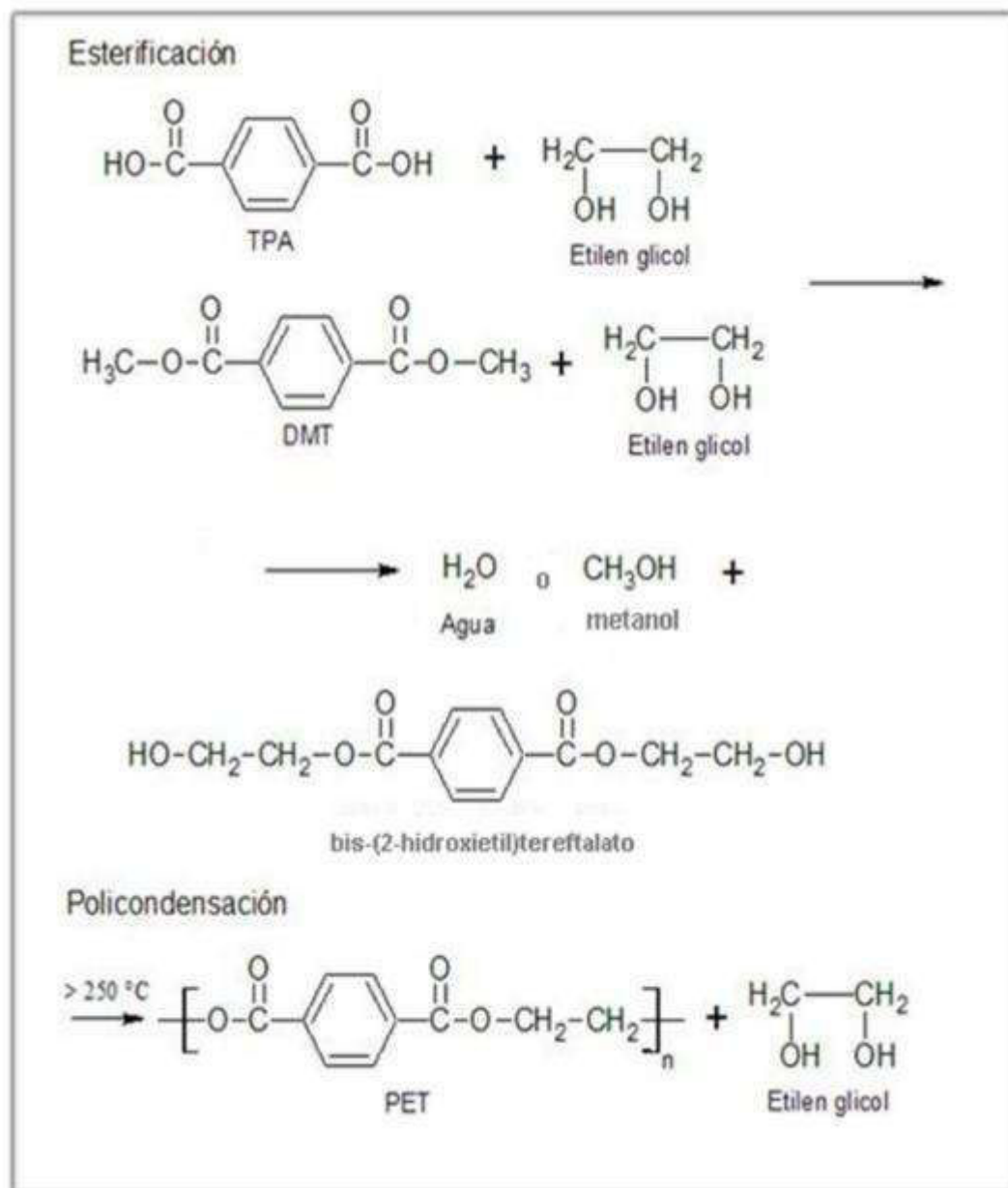


Después de la polimerización, “la masa del polímero alcanza la viscosidad deseada, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno en el reactor. En este punto se detiene la reacción y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación. La masa fundida, por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno, es obligada a pasar a través de una matriz, en forma de hilos gruesos, cayendo en un recipiente con agua, donde se enfrían y consolidan. Los hilos que pasan por una cortadora, se reducen a gránulos, los cuales, tamizados y despolvados se envían al almacenamiento y fabricación” [10].



**Figura 2.2: Síntesis del Poli(Tereftalato de Etileno) - PET**

Fuente: Proyecto 11 – Reciclaje de PET [11].



**Figura 2.3: Reacciones de Esterificación y Policondensación para la síntesis del PET**

Fuente: Proyecto 11 – Reciclaje de PET [11].

### 2.1.2 Características y propiedades del PET

El Poli(Tereftalato de Etileno) - PET cuenta con las siguientes características y propiedades:

- “Biorientación: Que permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores”.

- “Cristalización: Que permite lograr resistencia térmica para utilizar en bandejas termoformadas para hornos a elevadas temperaturas de cocción”.
- “Esterilización: El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma”.
- “Factor barrera: Se le denomina a la resistencia que ofrece el material con el que está constituido un envase al paso de agentes exteriores al interior del mismo. Estos agentes pueden ser por ejemplo: malos olores, gases ofensivos para el consumo humano, humedad, contaminación, etc. El PET se ha declarado excelente protector en el envasado de productos alimenticios, precisamente por su buen comportamiento barrera”.
- “Transparencia: Este material posee claridad y transparencia, en su estado natural (sin colorantes), muy alta, obteniéndose un elevado brillo; sin embargo, puede ser coloreado con pigmentos de colores adecuados sin ningún inconveniente”.
- “Peso: El PET es más ligero en referencia con otros polímeros, por ejemplo: un envase requiere de una consistencia aceptable para proteger el producto que contiene y dar sensación de seguridad al consumidor”.
- “Resistencia química: El PET es resistente a multitud de agentes químicos agresivos los cuales no son soportados por otros materiales”.
- “Degradación térmica: La temperatura soportable por el PET sin deformación, ni degradación, aventaja a la de otros materiales, ya que este material se extrusiona a temperaturas superiores a 250°C, siendo su punto de fusión de 260°C”.

- “Conformidad sanitaria: El PET supera a multitud de materiales en cuanto a calidad sanitaria por sus excelentes cualidades en la conservación del producto. El PET es un poliéster y como tal es un producto químicamente inherente y sin aditivos. Los envases fabricados correctamente son totalmente inofensivos en contacto con los productos de consumo humano”.
- “Reciclaje y recuperación: El PET puede ser fácilmente reciclado, principalmente por el proceso mecánico y ser nuevamente útil” [12].

**Tabla 2.1: Propiedades físicas del Poli(Tereftalato de Etileno) - PET**

Propiedades	Unidad	Valor
Densidad específica	g/cm <sup>3</sup>	1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 - 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 - 128
Módulo de elasticidad	MPa	3700
Elongación a la rotura	%	3.2
Resistencia dieléctrica	kV/mm	17
Viscosidad intrínseca	dl/g	0.72 - 0.84
Temperatura de fusión	°C	244 - 254
Calor específico	kcal/(kg.°C)	0.25
Conductividad térmica	W/(m.K)	0.29

Fuente: Proyecto 11 – Reciclaje de PET [11].

### 2.1.3 Usos y aplicaciones del PET

El PET se usa en una gran variedad de productos como:

- Envase y empaque
 

“Casi el 100% del mercado de botellas retornables y no retornables es abarcado por el PET, para bebidas gasificadas; también es usado como empaques de alimentos, pues no deterioran ni causan efectos de toxicidad a estos productos. La participación del PET dentro de este mercado está en: bebidas carbonatadas (gasificadas) y agua purificada, aceite, cosméticos, detergentes y productos farmacéuticos, etc”.

- Electro-electrónico

“En este segmento se abarca diversos tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultradelgadas para capacitores de un micrómetro hasta de 0.5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores”.

“Debido a su alta resistencia dieléctrica y mecánica, el PET es utilizado como aislante de ranuras y fases en motores, condensadores, bobinas y transformadores. Además, ha servido para ser utilizado en la fabricación de conectores eléctricos de alta densidad, bloques terminales, circuitos integrados y partes electro-mecánicas, reemplazando de este modo a los materiales termoestables”.

- Fibra textil

“En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir. La ropa hecha con esta fibra es resistente a arrugas”.

- Aplicaciones en la industria mecánica

“El PET es utilizado en la fabricación de repuestos que necesitan superficies duras, planas y buena estabilidad dimensional. Por ejemplo en engranajes, levas, cojinetes, pistones y en bastidores de bombas que soportan fuerzas de impacto”.

“Los compuestos reforzados de PET son usados para fabricar tapas de distribuidores y componentes de pintura exterior para automóviles”.

- Otras aplicaciones

“El PET se utiliza para producir bandejas de horno convencional o microondas. También se emplea en monofilamentos para fabricar cerdas de escobas y cepillos” [1].

## **2.2 RECICLAJE DEL PET**

Actualmente, el PET es el material plástico que más se recupera de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). El PET es el plástico más reciclado en el mundo, su abundancia relativa y facilidad para reciclarlo hace que muchos emprendimientos empresariales de reciclaje de plásticos opten por este material.

Entre las ventajas y beneficios del reciclaje de PET tenemos:

- La recuperación del valor de la extensión de la vida útil de los rellenos sanitarios.
- La disminución del consumo de recursos naturales y ahorro de energía.
- La generación de empleo de forma directa e indirecta.
- La reducción de la contaminación ambiental disminuyendo las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El proceso de reciclaje del PET se inicia con la recolección de los envases post-consumo, este es el punto más crítico en la cadena de reciclaje del PET. Luego de la recolección de los envases, pasan a ser seleccionados según el color y triturados hasta un tamaño promedio de 12 mm, éstos son finalmente lavados y secados, a partir de este punto se continúa con el proceso de fabricación de nuevos productos que cerrarán el ciclo del reciclaje, según el camino que se tome a partir de este punto se definirá el reciclaje mecánico o reciclaje químico [1].

### **2.2.1 Reciclaje mecánico del PET**

El tratamiento de los residuos plásticos por medio de la presión y el calor para volver a darles forma y conseguir otros objetos iguales o distintos de los iniciales, esta referido al reciclaje mecanico. Es aplicable solo a los termoplásticos, ya que estos materiales son reciclables por naturaleza.

Una planta donde los envases PET post-consumo se transforman en hojuelas limpias siguiendo el reciclaje mecánico tiene las siguientes operaciones:

- **Rotura de pacas y selección**

Las pacas (fardos de envases prensados) de PET post-consumo se rompen y son depositados sobre una faja transportadora para su selección final; seleccionándose los envases manualmente o automáticamente de acuerdo con su color y se separan los plásticos diferentes al PET.

- **Molienda**

Los envases se convierten en hojuelas (scraps) mediante un molino de cuchillas diseñado para cortar a los envases sin causar excesivo calor, ya que lo fundiría.

- **Separación**

Después de la molienda, las hojuelas se dirigen a depósitos de flotación, donde el PET se hunde en el fondo y flotan los plásticos más ligeros; tapitas y etiquetas, compuestas principalmente por PP (Polipropileno) y PEBD (Polietileno de Baja Densidad); respectivamente. Si la mezcla no se separa eficientemente, tal vez se necesite una serie de depósitos de flotación.

- **Lavado**

Las hojuelas se lavan en caliente con solución de soda cáustica y detergente al 2% p/v, con agitación; entre 80 y 90°C, para lograr la separación de etiquetas pegadas, adhesivos y suciedad.

- **Enjuague**

Para esto se emplea un separador centrífugo, donde se separan las hojuelas de PET del agua sucia, arenilla y restos de plástico fino. Luego se ingresan a depósitos con agua para retirar restos de soda cáustica, detergente y suciedad.



- **Secado**

Después del enjuague, las hojuelas de PET se han convertido en un flujo de PET con humedad. Se utiliza un secador centrífugo que consigue separar el agua y se procede a secar las hojuelas de PET con aire caliente para reducir el contenido de humedad hasta 0.5% aproximadamente.

- **Peletizado**

“Es la etapa por el que se obtienen los pellets mediante una operación de extrusión. Se fluidizan las hojuelas utilizando un tornillo de extrusión dentro de un cilindro largo. Las hojuelas son introducidas en la extrusora en el extremo del tornillo con el diámetro más grande y se comprimen mientras se llevan hacia la boquilla de extrusión. Previamente y de ser necesario se añaden los aditivos. Inmediatamente antes de la boquilla, la mezcla fundida pasa a través de una malla fina que separa las impurezas sólidas restantes; a este paso se le llama como filtración de fundido”.

- **Procesado final**

“El material plástico reciclado; hojuelas de PET o pellets de PET, pueden ser procesadas mediante: moldeo por inyección, moldeo por soplado, extrusión, termoformado, hilado de fibras; de acuerdo al producto que se requiere producir” [13].

### **2.2.2 Reciclaje químico del PET**

Al respecto; “el reciclaje químico es un proceso por el que a partir de materiales post- consumo se llega a la obtención de sus monómeros de partida, que serán transformados en plásticos o en otros derivados. Este proceso puede denominarse como *la reacción reversible de la polimerización* hasta la recuperación de las materias primas, este método es diferente según el tipo de polimerización que se haya seguido. Dentro del reciclaje químico los principales procesos son:”

- **Craqueo y pirólisis térmica:**

“Los tratamientos que se dan a las fracciones pesadas del petróleo son también aplicables a los plásticos. Pueden ser térmicos o realizarse en presencia de un catalizador. Entre los primeros figuran el craqueo térmico y la pirólisis que se realizan en ausencia de oxígeno a temperaturas entre 400 y 800°C a presión reducida. En el caso del PET tras su pirólisis se genera carbón activado, el cual puede ser usado posteriormente”.

- **Hidrogenación:**

Cabe mencionar que, “en este proceso se licúa los residuos plásticos antes de ser sometidos a tratamientos de pirólisis, los residuos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas, subproducto del cual la empresa también podría sacar beneficio con su venta”.

- **Gasificación:**

“El calentamiento al que se somete los plásticos en presencia de aire u oxígeno produce reacciones de oxidación que conducen a la obtención de gas de síntesis, que es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. Este proceso permite el tratamiento de mezclas de plásticos. La aplicación del gas de síntesis como combustible permite la valorización energética de los plásticos, ofrece ventajas como la prevención de las emisiones a la atmósfera”.

- **Reacciones de despolimerización (chemolysis):**

“El objetivo es recuperar los monómeros de partida que se destinan nuevamente a la obtención de polímero. Tal es el caso de los poliésteres, poliamidas y poliuretanos. Estas reacciones están asociadas a procesos hidrolíticos, las más importantes que se aplican al PET son:”

- *Metanólisis*

“Es la despolimerización completa del plástico por acción del metanol. Consiste en una trans-esterificación, los cuales tras su purificación son polimerizados nuevamente”.

- *Glicólisis*

“Es la despolimerización parcial por acción del etilenglicol. La mezcla obtenida se somete tras la purificación, a la polimerización con resina virgen”.

- *Hidrólisis*

“Es la despolimerización total por medio del agua en presencia de ácidos o álcalis. No es conveniente su uso ya que presenta dificultad a la hora de purificar el ácido tereftálico que se obtiene en la reacción” [14].

### **2.2.3 Valorización energética del PET**

“Otro tipo de tratamiento térmico que se realiza para plásticos muy degradados, es la valorización energética. Es una alternativa de la incineración, donde la energía asociada a la combustión es recuperada con fines energéticos, asemejándose a una central térmica. Dado que el PET es un polímero formado por átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno, al ser quemado produce  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  con desprendimiento de energía, este calor es el que se recupera. Lo que le permite contribuir a reducir la contaminación y sus consecuentes efectos; como sería la lluvia ácida ya que no se genera óxidos de azufre”.

“El PET tiene un poder calorífico de 23.0 MJ/kg; similar al carbón mineral, 24.5 MJ/kg; y a la que poseen otros combustibles derivados del petróleo. Por tanto, la valorización energética constituye una opción digna de tenerse en cuenta, ya que contribuye al ahorro de fuentes de energía no renovables” [11].

#### **2.2.4 Reciclaje de envases PET post-consumo en el Perú**

En el Perú se realiza el reciclaje mecánico principalmente, aunque también el reciclaje químico en menor proporción; la cantidad de PET que se recicla se incrementa año tras año, siendo su principal destino de exportación el mercado de Estados Unidos e Irlanda para la industria de empaques termoformados, y el mercado de China para la industria textil de fibra de poliéster.

Por ejemplo, empresas que producen pinturas como Anypsa Perú SA realizan glicólisis a partir de las hojuelas de PET reciclado para obtener resina tereftálica para la producción de un porcentaje de sus productos [1].

Además, el Grupo AJE inauguró en agosto de 2016 su nueva planta de reciclaje de envases PET post-consumo en el distrito de Puente Piedra, en la ciudad de Lima, para la obtención de plástico PET reciclado y producir nuevos envases, con una capacidad de reciclaje de 700 TM/mes [15].

La empresa San Miguel Industrias PET SA cuenta con una Unidad de Negocio CleaRPET que recicla envases PET post-consumo para la producción de envases nuevos, incluyendo 25% de hojuelas de PET reciclado y 75% de resina virgen; además afirma que la tasa de reciclaje de envases PET post-consumo en el Perú es de 35%, año 2016. Actualmente procesa 1200 TM/mes de envases PET post-consumo, en su planta ubicada en Cercado de Lima [16].

La empresa Peruana de Moldeados SA cuenta con una Unidad de Negocio Recicloplas Perú que recicla envases PET post-consumo para la producción de empaques termoformados. Actualmente recicla 200 TM/mes de envases PET post-consumo en su planta ubicada en el Callao [17].

La empresa Gexim SAC produce fibra de poliéster a partir de envases 100% PET post-consumo. Actualmente recicla 350 TM/mes de envases PET post-consumo en su planta de reciclaje mecánico ubicada en el distrito de Ate, ciudad de Lima [18].

En la Tabla 2.2 se muestra a las principales empresas en el Perú fabricantes de productos de mayor valor agregado a partir de hojuelas de PET reciclado y el tipo de reciclaje que realizan.

**Tabla 2.2: Empresas en el Perú fabricantes de productos de mayor valor agregado a partir de PET reciclado**

<b>Empresas</b>	<b>Tipo de Reciclaje</b>	<b>Cantidad (TM/mes)</b>	<b>Producto</b>
San Miguel Industrias PET SA (CleaRPET)	Mecánico	1 200	Envases nuevos
Grupo AJE	Mecánico	700	Envases nuevos
Peruana de Moldeados SA (Recicloplas Perú)	Mecánico	200	Empaques termoformados
Anypsa Perú SA	Químico	30	Resina tereftálica
Melaform SAC	Mecánico	40	Menaje para el hogar
Gexim SAC	Mecánico	350	Fibra de poliéster

Fuente: Elaboración propia

### **2.2.5 Reciclaje de envases PET post-consumo a nivel mundial**

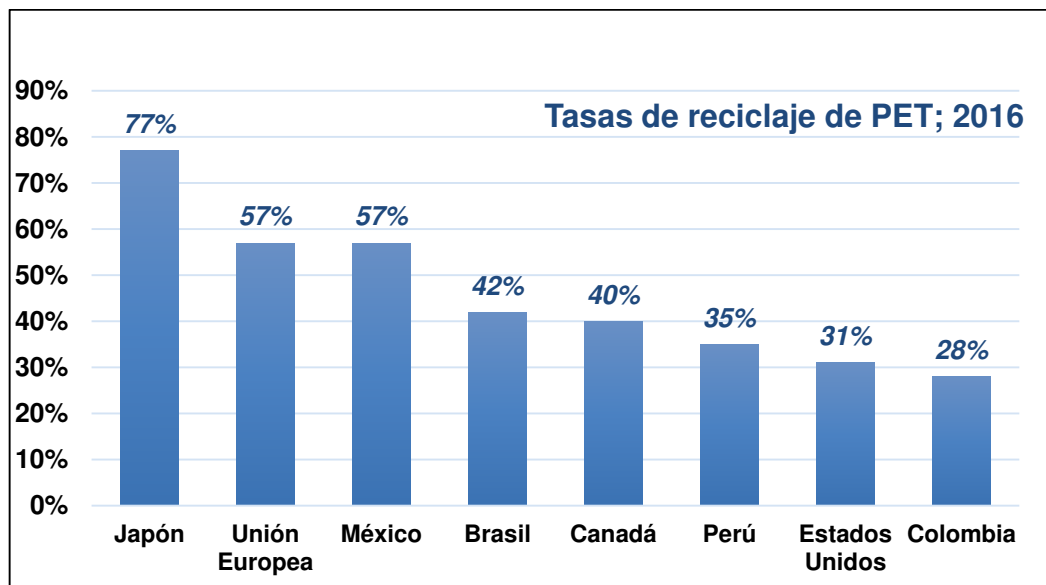
En la Unión Europea se realiza el reciclaje mecánico, reciclaje químico, aunque también la valorización energética; la cantidad de PET que se recicla se incrementa año tras año, y el reciclaje de envases PET post-consumo ya no representa un problema tecnológico.

La tasa de reciclaje de envases PET post-consumo (volumen total de recolección/volumen de envases vendidos) en la Unión Europea es de 57%, año 2016; siendo en Francia, Alemania e Italia alrededor de 48%; en España y Reino Unido alrededor de 71%.

La tasa de reciclaje de plástico PET post-consumo en Brasil es de 42%, año 2016 y en México se recupera casi el 57% del PET que se manda al mercado, de acuerdo con ECOCE (Ecología y Compromiso Empresarial, A.C. de México); es la tasa de recuperación más alta de América, comparable con la Unión Europea.

La tasa de reciclaje en 2016 para envases de Poli(Tereftalato de Etileno) - PET fue de 31% en los Estados Unidos, 40 % en Canadá, 35% en Perú y 28% en Colombia [19].

En Japón, según el Consejo de Reciclaje de envases PET de ese país, la tasa de reciclaje es de 77%, año 2016. [20].



**Figura 2.4: Tasas de reciclaje de envases PET post-consumo a nivel mundial**

Fuente: ECOCE – Ecología y Compromiso Empresarial, A.C. de México [19].

## **2.3 RECICLAJE DE PLÁSTICOS**

El significado de reciclaje de plásticos es la recuperación y el reprocesamiento de los mismos cuando su vida útil terminó, para usarlos en nuevas aplicaciones. Debido al amplio uso en el embalaje y el envasado, la mayor parte de los residuos plásticos son de origen doméstico.

Los plásticos son sustancias poliméricas, usualmente sintetizados a partir de derivados químicos del petróleo, en las que una macromolécula lineal o tridimensional está constituida por la repetición de unidades denominadas monómeros. Un plástico puede estar constituido por un solo tipo de monómero (homopolímero) o por varios (copolímero) [13].

### **2.3.1 Clasificación de los plásticos**

Los plásticos en función de su comportamiento mecánico y térmico, se clasifican en tres categorías principales:

#### **- Termoplásticos**

Al calentarse fluyen como líquidos viscosos y al enfriarse se solidifican. El enfriamiento y calentamiento puede realizarse cuantas veces se quiera sin perder las propiedades del material. Este tipo de plásticos componen aproximadamente el 85% de los plásticos consumidos y son reciclables. Los principales tipos de termoplásticos son: Poli(Tereftalato de Etileno), Polietileno de Alta y Baja Densidad, Polipropileno, Poliestireno, Policloruro de Vinilo, etc.

#### **- Termoestables**

Se funden al aplicar calor y se solidifican al aplicar aún más calor. Estos no pueden ser recalentados y remodelados pero pueden reprocesarse por fusión. Estos polímeros generalmente son más resistentes, aunque más frágiles, que los termoplásticos. Los principales tipos de termoestables son: resina de poliéster, úrea formaldehído, fenol formaldehído (bakelita), siliconas, etc.

## **- Elastómeros**

Estos plásticos son un grupo de polímeros de origen vegetal o sintético. Se conocen como cauchos. Tienen una deformación elástica mayor a 200%. Es posible que se trate de termoplásticos o de termoestables ligeramente entrelazados. Tienen forma de moléculas en espiral sus cadenas poliméricas y pueden estirarse de manera reversible al aplicárseles una fuerza. Los principales tipos de elastómeros son: caucho natural, polibutadieno, neopreno, etc. [21].

### **2.3.2 Codificación de los plásticos**


En 1988, “la Society of the Plastics Industry – SPI (Sociedad de la Industria del Plástico) de Estados Unidos a petición de las industrias recicladoras, desarrolló un sistema de códigos para la identificación de los distintos tipos de plástico que se utilizan en la fabricación de productos”.

Código SPI se ha denominado a este sistema y facilita la clasificación para su posterior reciclado, donde: *“Los productos plásticos se identifican mediante un símbolo compuesto de tres flechas que forman un triángulo con su número en el centro y letras en la base. El triángulo de flechas es conocido como el símbolo universal del reciclaje y el número y las letras indican la resina utilizada. Este sistema sirve para separar los materiales representados por los seis primeros símbolos (que representan la gran mayoría de los materiales plásticos), el número 7 está reservado para el resto de los materiales”*.

El sistema de codificación de la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI, por sus siglas en inglés) es un medio para identificar los residuos de plástico aceptada desde Estados Unidos hasta China, pasando por Europa [22].



**Tabla 2.3: Códigos de identificación de los plásticos reciclables**

<b>Códigos</b>	<b>Nombres</b>	<b>Usos</b>
 <b>PET</b>	Poli(Tereftalato de Etileno)	Envases de bebidas carbonatadas (gasificadas), jugos, jarabes, aceites comestibles, bandejas, artículos de farmacia, etc.
 <b>PEAD</b>	Polietileno de Alta Densidad	Envases de leche, detergentes, champús, baldes, bolsas, tanques de agua, cajones para pescado, etc.
 <b>PVC</b>	Policloruro de Vinilo	Tuberías de agua, desagüe, aceites lubricantes, mangueras, cables, material de uso médico como catéteres, etc.
 <b>PEBD</b>	Polietileno de Baja Densidad	Bolsas para residuos, contenedores, etiquetas para bebidas, film para agricultura etc.
 <b>PP</b>	Polipropileno	Envases de alimentos, materiales para la industria automotriz, tuberías de agua caliente, etc.
 <b>PS</b>	Poliestireno	Envases para alimentos congelados, aislante para heladeras, juguetes, rellenos, etc.
 <b>Otros</b>	Policarbonato, Resinas epoxídicas, fenólicas, etc.	Discos compactos de DVD, elementos moldeados como enchufes, asas de recipientes de cocina, autopartes, espuma de colchones, etc.

Fuente: Sociedad de la Industria del Plástico (SPI). [22].

## 2.4 PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA (PML)

Al respecto, la *Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia (INDECOPI, 2007)* señala que: *“Producción Más Limpia es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada para los procesos, productos y servicios con el objetivo de incrementar la eficiencia y reducir los riesgos sobre la población humana y el ambiente. Puede ser aplicada a los procesos utilizados en cualquier organización, para productos y servicios diversos brindados dentro de la sociedad”*.

Además, **la PML en los procesos productivos** resulta de uno o la combinación de:

- La conservación y ahorro de materias primas, agua y energía, entre otros insumos.
- La eliminación de materias primas e insumos tóxicos y peligrosos mediante la sustitución, con el fin de reducir los impactos negativos que acompañan su extracción, almacenamiento, uso o transformación.
- Reducción en la fuente de la cantidad y toxicidad del total de las emisiones y residuos durante el proceso productivo.

**La PML en los productos** está dirigido a:

- La reducción de los impactos del producto en el ambiente, la salud y la seguridad durante su ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima, su manufactura y uso, hasta su disposición final.

**La PML en los servicios** está dirigido a:

- La incorporación de consideraciones ambientales en el diseño y prestación del servicio [23].

### 2.4.1 Principios de Producción Más Limpia

Los principios de la PML están relacionados con las definiciones de desarrollo sostenible, prevención de la contaminación, internalización de costos e innovación tecnológica, que se detallan a continuación:

**a. Principio de sostenibilidad:**

“Se refiere a la integración equilibrada de los aspectos sociales, ambientales y económicos del desarrollo, así como en la satisfacción de las necesidades de las actuales y futuras generaciones. La PML constituye lograr un equilibrio entre los aspectos ambientales y económicos al hacer un uso eficiente de los recursos, disminuyendo de esta manera los impactos ambientales que afectan a la sociedad”.

**b. Principio de prevención:**

“La PML como estrategia que permita minimizar los efectos negativos que los procesos productivos generen sobre el ambiente”.

**c. Principio de internalización de costos:**

“El costo de las acciones de prevención relacionadas con la protección del ambiente y de sus componentes de los impactos negativos de las actividades humanas debe ser asumido por los causantes de dichos impactos”.

**d. Principio de innovación tecnológica:**

“Estrategia clave dirigida al desarrollo de nuevos procesos y productos, mediante la generación, transferencia, incorporación y adaptación de tecnologías; representa un trabajo sistemático que implica ver el cambio como una oportunidad, superar lo gastado, lo obsoleto, lo improductivo, llevar ideas nuevas al nivel de realización práctica, hasta que sean utilizables y aplicables. La innovación es producto de la creatividad del hombre y la mujer, y el ejemplo eficaz de las herramientas de ciencia y tecnología. Impulsar la innovación en los sectores productivos de bienes y servicios, requiere de una organización y gestión de sus sistemas de innovación” [23].

#### 2.4.2 Herramientas de Producción Más Limpia

Sobre el particular (Hoof, Monroy y Saer, 2008) señalan que; “las herramientas de Producción Más Limpia son instrumentos que permiten definir el estado ambiental y económico de un producto o proceso, ya sea administrativo o productivo, y con base en su aplicación establecer los objetivos de las alternativas preventivas a implementar”.

“Las herramientas más utilizadas para la aplicación de la Producción Más Limpia se relacionan con las etapas de planeamiento, implementación, evaluación y revisión de alternativas preventivas. Estas mismas etapas forman también la estructura básica de un Sistema de Gestión Ambiental”.

Entre las herramientas de Producción Más Limpia se encuentran:

- **”Revisión Inicial Ambiental:** primer elemento clave en la etapa de planeamiento para el sistema de gestión ambiental para la mejora continua. Esta herramienta proporciona una *fotografía* del desempeño ambiental de una empresa en un momento determinado”.
- **”Ecomapa:** herramienta práctica y de fácil aplicación que permite hacer un inventario rápido de prácticas y problemas de múltiples variables mediante el uso de figuras”.
- **”Ecobalance:** método estructurado para reportar los flujos, hacia el interior y el exterior, de recursos, materias primas, energía, productos, subproductos y residuos que ocurren en una organización en particular y durante un cierto período”.
- **”Matriz MED (Materiales-Energía-Desechos):** determina la relación directa de los efectos generados por los diferentes impactos ambientales en las distintas etapas del ciclo de vida del producto”.
- **”Buenas Prácticas de Manufactura:** conjunto de medidas orientadas a la gestión y organización adecuadas de la empresa y a la optimización de recursos humanos y materiales con el fin de disminuir residuos y emisiones”.

- **“Análisis de Riesgo:** identifica aquellas situaciones que representen riesgos en la producción y en la comunidad que utiliza el producto o servicio ofrecido por la empresa”.
- **“Auditorías Ambientales:** busca la optimización de los procesos en la empresa, específicamente en el área ambiental”.
- **“Ecoindicadores:** apoyan el proceso de toma de decisiones específicas con respecto a temas de interés”.
- **“La herramienta de los costos de ineficiencia:** para identificar las alternativas preventivas que contribuyen a la competitividad empresarial. Estas ineficiencias se muestran en los costos relacionados con el manejo ambiental, los costos de no calidad y los costos de oportunidad por el no aprovechamiento de recursos” [24].

#### **2.4.3 Beneficios de implementar un programa de Producción Más Limpia**

Según la *“Guía Peruana GP 900.200:2007 (INDECOPI, 2007);* los beneficios para las empresas que implementan un programa de Producción Más Limpia incluyen”:

- “Mejoras en la productividad y la rentabilidad: los cambios a efectuarse en la producción conllevan a un aumento en la rentabilidad, debido a un mejor aprovechamiento de los recursos y a una mayor eficiencia en los procesos, entre otros”.
- “Mejoras en el desempeño ambiental: un mejor uso de los recursos reduce la generación de residuos, los cuales pueden, en algunos casos reciclarse, reutilizarse o recuperarse. Por consiguiente, se reducen los costos y se simplifican las técnicas requeridas para el tratamiento al final del proceso y para la disposición final de los residuos”.
- “Mejoras en la imagen de la empresa: por vender productos de calidad y que fueron producidos con procedimientos y técnicas amigables con el medio ambiente”.

- “Incremento del valor agregado del producto final, debido a la exigencia de mercados que incluyen dentro de sus requerimientos de compra la variable ambiental”.
- “Mejoras en el entorno laboral: contribuye a la seguridad industrial, higiene, relaciones laborales, motivación, etc”.
- “Adelantarse a gestiones futuras inevitables: a corto o mediano plazo, las organizaciones deberán adecuarse a la reglamentación ambiental. Ante esta realidad, es preferible ser parte de la gestión del cambio antes que se imponga por la reglamentación o por las exigencias del mercado, tomando en cuenta que los recursos son limitados y, en el largo plazo, las empresas no tendrán derecho a *derrochar* recursos, que a otros les puede faltar, aunque paguen por ellos”.
- “Aporta el enfoque preventivo dentro de los Sistemas voluntarios de Gestión Ambiental, y las Evaluaciones de Impacto Ambiental y los Programas de Manejo Ambiental requeridas por las autoridades ambientales” [23].

#### 2.4.4 Estrategias de Producción Más Limpia

Al respecto, la *Guía Peruana GP 900.200:2007*, menciona que entre las estrategias de Producción Más Limpia se tiene:

- “**Buenas prácticas operativas:** procedimientos de organización y métodos, prácticas de gestión, segregación de residuos, mejor manejo de materiales, cronograma de producción, control de inventario y capacitación”.
- “**Mejor control de los procesos:** procedimientos operativos e instrucciones de los equipos redactados en forma clara y disponible de manera que los procesos se ejecuten más eficientemente y produzcan menos residuos y emisiones. Registro de las operaciones para verificar el cumplimiento de especificaciones de procesos”.

- “**Reutilización, recuperación y reciclaje in situ**: reutilización de materiales residuales dentro del mismo proceso para otra aplicación en beneficio de la empresa”.
- “**Producción de subproductos útiles**: transformación del residuo en un subproducto que puede ser vendido como insumo para empresas en diferentes sectores del negocio”.
- “**Sustitución de insumos**: insumos menos tóxicos, materiales renovables, materiales auxiliares que tengan un tiempo de vida más largo en anaquel”.
- “**Reformulación o rediseño del producto**: diseño con menor impacto ambiental durante el tiempo de vida del producto, diseño con menor impacto ambiental durante su producción, incremento de la vida útil del producto”.
- “**Modificación del equipo**: mejor equipo, mejores condiciones de operación, equipo de producción e instalaciones de manera que los procesos se hagan con mayor eficiencia y se generen menores residuos y emisiones”.
- “**Cambio de tecnología**: actualización tecnológica en la empresa, mayor automatización, mejores condiciones de operación, reingeniería de procesos” [23].

#### **2.4.5 Barreras para la aplicación de Producción Más Limpia**

Según (Hoof, Monroy y Saer, 2008) sostienen que: “Existen diferentes factores que influyen en la competitividad de las empresas, los cuales pueden convertirse en *barreras* para la aplicación de Producción Más Limpia (PML) si no son bien manejados, o no son reconocidos, o bien en variables que no permiten la satisfacción de todas las necesidades de los actores interesados. El desafío de la estrategia de PML está en enfrentar estas barreras y así facilitar su implementación. Existen dos grupos de barreras dentro del contexto empresarial”:

#### **a. Barreras del entorno de la empresa**

- “Barreras del mercado: directamente relacionados con los clientes de la empresa, o con los potenciales clientes de la misma”.
- “Barreras financieras externas: aquellos obstáculos que enfrenta un empresario para obtener y aprovechar recursos potenciales para el desarrollo de su estrategia empresarial”.
- “Barreras legislativas: la legislación ambiental en sus inicios buscó medidas rápidas a los problemas de contaminación ambiental, y estas medidas generalmente tienden a privilegiar las soluciones de **fin de tubo**, las cuales no atacan las causas de los problemas y requieren inversiones que no se recuperan. La legislación ambiental tiene otros riesgos, entre los cuales están las presiones políticas y los problemas sociales”.

#### **b. Barreras internas de la empresa**

- “Barreras tecnológicas: falta de divulgación y promoción de tecnologías limpias al alcance de medianas y pequeñas empresas”.
- “Barreras organizacionales: falta de compromiso de los directores de las empresas, falta de comunicación interna, resistencia al cambio, etc”.
- “Barreras financieras internas: normalmente las empresas tienden a mirar más la rentabilidad a corto que a largo plazo; bajo esta óptica muchas inversiones de PML están en desventaja” [24].



## **2.5 MARCO LEGAL APLICABLE EN LA INDUSTRIA DEL RECICLAJE DE ENVASES PET POST-CONSUMO**

De acuerdo a La Legislación Peruana se contempla las siguientes Leyes, Decretos Legislativos y Decretos Supremos aplicables en el desarrollo de la *industria del reciclaje de envases PET post-consumo*:

### **2.5.1 Ley N°28611 – Ley General del Ambiente (2005)**

La presente Ley N°28611 – Ley General del Ambiente, aprobada en el año 2005, “es la norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país”.

“Las disposiciones contenidas en la presente Ley, así como en sus normas complementarias y reglamentarias son de obligatorio cumplimiento para toda persona natural o jurídica, pública o privada, dentro del territorio nacional, el cual comprende el suelo, subsuelo, el dominio marítimo, lacustre, hidrológico e hidrogeológico y el espacio aéreo”.

“La presente Ley regula las acciones destinadas a la protección del ambiente que deben adoptarse en el desarrollo de todas las actividades humanas. La regulación de las actividades productivas y el aprovechamiento de los recursos naturales se rigen por sus respectivas leyes, debiendo aplicarse la presente Ley en lo que concierne a las políticas, normas e instrumentos de gestión ambiental”.

La Ley N°28611 – Ley General del Ambiente contempla las siguientes definiciones:

- “**La Gestión Ambiental**; es un proceso permanente y continuo, constituido por el conjunto estructurado de principios, normas técnicas, procesos y actividades, orientado a administrar los intereses, expectativas y recursos relacionados con los objetivos de la política ambiental y alcanzar así, una mejor calidad de vida y el desarrollo integral de la población, el desarrollo de las actividades económicas y la conservación del patrimonio ambiental y natural del país”.
- “**El Estándar de Calidad Ambiental (ECA)**; es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos”.
- “**El Límite Máximo Permisible (LMP)**; es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos”.

#### Artículo 74° - De la responsabilidad general

“Todo titular de operaciones (persona natural o jurídica) es responsable por las emisiones, efluentes, descargas y demás impactos negativos que se generen sobre el ambiente, la salud y los recursos naturales, como consecuencia de sus actividades. Esta responsabilidad incluye los riesgos y daños ambientales que se generen por acción u omisión”.

#### Artículo 76° - De los sistemas de gestión ambiental y mejora continua

“El Estado promueve que los titulares de operaciones adopten sistemas de gestión ambiental acordes con la naturaleza y magnitud de sus operaciones, con la finalidad de impulsar la mejora continua de sus niveles de desempeño ambiental”.

#### Artículo 77° - ***De la promoción de la producción limpia***

“Las autoridades nacionales, sectoriales, regionales y locales promueven, a través de acciones normativas, de fomento de incentivos tributarios, difusión, asesoría y capacitación, la producción limpia en el desarrollo de los proyectos de inversión y las actividades empresariales en general, entendiendo que la producción limpia constituye la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada para los procesos, productos y servicios, con el objetivo de incrementar la eficiencia, manejar racionalmente los recursos y reducir los riesgos sobre la población humana y el ambiente, para lograr el desarrollo sostenible”.

“Las medidas de producción limpia que puede adoptar el titular de operaciones incluyen, según sean aplicables, control de inventarios y del flujo de materias primas e insumos, así como la sustitución de éstos; la revisión, mantenimiento y sustitución de equipos y la tecnología aplicada; el control o sustitución de combustibles y otras fuentes energéticas; la reingeniería de procesos, métodos y prácticas de producción; y la reestructuración o rediseño de los bienes y servicios que brinda, entre otras” [25].

#### **2.5.2 Decreto Legislativo N°1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (MINAM - 2016)**

La Ley N°27314 – Ley General de Residuos Sólidos, publicada en el Diario Oficial El Peruano el 21 de julio de 2000, “ha sido modificada en diversas oportunidades a fin de actualizarla; y resulta necesario contar con una

nueva norma que permita asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a los principios de minimización, prevención de riesgos ambientales y protección a la salud y el bienestar de la persona. De conformidad con lo establecido se aprobó el Decreto Legislativo N°1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos, promovida por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y la Presidencia del Consejo de Ministros (PCM), publicada en el Diario Oficial El Peruano el 23 de diciembre de 2016, la misma que establece la derogatoria de la Ley N°27314 – Ley General de Residuos Sólidos, a partir de la entrada en vigencia de su Reglamento”.

“El presente Decreto Legislativo establece derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos económica, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a las obligaciones, principios y lineamientos de este Decreto Legislativo”.

“La gestión integral de los residuos sólidos en el país tiene como primera finalidad la prevención o minimización de la generación de residuos sólidos en origen, frente a cualquier otra alternativa. En segundo lugar, respecto de los residuos generados, se prefiere la recuperación y la valorización material y energética de los residuos, entre las cuales se cuenta la reutilización, reciclaje, compostaje, coprocesamiento, entre otras alternativas siempre que se garantice la protección de la salud y del medio ambiente”.

“Se aplica a la producción, importación y distribución de bienes y servicios en todos los sectores productivos del país. A las actividades, procesos y operaciones de la gestión y manejo de residuos sólidos, desde la generación hasta su disposición final, incluyendo todas las fuentes de generación, enfatizando la valorización de los residuos. Asimismo, comprende las actividades de internamiento, almacenamiento, tratamiento y transporte de residuos por el territorio nacional”.

“No están comprendidas en el ámbito de este Decreto Legislativo los residuos sólidos de naturaleza radiactiva, cuya gestión es competencia del Instituto Peruano de Energía Nuclear; los residuos propios de actividades militares para la seguridad y defensa de la nación, cuya gestión es competencia del Ministerio de Defensa” [26].

### **2.5.3 Decreto Supremo N°001-2015-VIVIENDA – Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario (2015)**

La presente norma trata de “la modificación del Decreto Supremo N°021-2009-VIVIENDA, que aprueba Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario; modificándose los artículos 2, 4, 5, 7, 8 y el Anexo N°2 del Decreto Supremo N°021-2009-VIVIENDA, que aprueba Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario”.

“Esta norma regula mediante VMA las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario con el fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad del alcantarillado y tratamiento de aguas residuales”.

“Los VMA son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales no domésticas en el alcantarillado sanitario, su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento como SEDAPAL”.

El presente Decreto Supremo N°001-2015-VIVIENDA contempla las siguientes definiciones:

- **“Aceites y grasas:** Son sustancias insolubles en agua y en líquidos menos densas que ella y solubles con disolventes orgánicos tales como nafta, éter, benceno y cloroformo, permaneciendo en la superficie de las aguas residuales dando lugar a la aparición de natas y/o espumas”.
  - **“Agua residual no doméstica:** Descarga de líquidos producidos por alguna actividad económica comercial e industrial, distintos a los generados por los usuarios domésticos, quienes descargan aguas residuales producto de la preparación de alimentos, del aseo personal y de desechos fisiológicos”.
  - **“Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para la estabilización de la materia orgánica bajo condiciones de tiempo y temperatura específicos (generalmente 5 días y a 20°C)”.
  - **“Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es la medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidante sales inorgánicas de permanganato o dicromato de potasio”.
  - **“Laboratorio acreditado:** Es el laboratorio que ha obtenido el Certificado de Acreditación otorgado por el INDECOPI, para realizar el análisis de aguas residuales en los parámetros establecidos en los Anexos N°1 y N°2 del Decreto Supremo N°021-2009-VIVIENDA”.
  - **“Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Son partículas orgánicas o inorgánicas que son retenidas por una fibra de vidrio que posteriormente es secada a una determinada temperatura”.
  - **“Usuario No Doméstico:** Es la persona natural o jurídica que realiza descarga de aguas residuales no domésticas al sistema de alcantarillado sanitario” [27].
- “Entiéndanse por **Valores Máximos Admisibles (VMA)**, como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o

químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias y equipos de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales” [28].

En la Tabla 2.4 se muestra los parámetros que están reglamentados, las unidades de medición y los valores máximos admisibles.

**Tabla 2.4: Valores Máximos Admisibles (VMA) para descargas al sistema de alcantarillado sanitario**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Expresión</b>	<b>VMA para descargas al sistema de alcantarillado</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	SST	500
Aceites y grasas (A y G)	mg/l	A y G	100
pH	unidad	pH	6 - 9
Temperatura	°C	T	menor a 35

Fuente: Decreto Supremo N°021-2009-VIVIENDA – Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el Sistema de Alcantarillado [28].

#### **2.5.4 Decreto Supremo N°003-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire (MINAM - 2017)**

Mediante la presente norma “se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Los ECA para Aire son un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, a cargo de los titulares de actividades productivas, extractivas y de servicios”.

“Los **Estándares de Calidad Ambiental (ECA)** se refieren a valores que no representan riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente, siendo que el concepto de valor guía de la calidad del aire, desarrollado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se refiere al valor de la concentración de los contaminantes en el aire por debajo del cual la exposición no representa un riesgo significativo para la salud”.

“La aplicación de los ECA para Aire en los instrumentos de gestión ambiental aprobados, que sean de carácter preventivo, se realiza en la actualización o modificación de los mismos, en el marco de la normativa vigente del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA). En el caso de instrumentos correctivos, la aplicación de los ECA para Aire se realiza conforme a la normativa ambiental sectorial”.

“Asimismo, esta norma dispone la derogatoria de normas referidas al ECA para Aire tales como: el Decreto Supremo N°074-2001-PCM, el Decreto Supremo N°069-2003-PCM, el Decreto Supremo N°003-2008-MINAM y el Decreto Supremo N°006-2013-MINAM” [29].

En la Tabla 2.5 se muestra los parámetros que están reglamentados, las unidades de medición, valores, criterios de evaluación; de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire.



**Tabla 2.5: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire**

<b>Parámetros</b>	<b>Período</b>	<b>Valor [ <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> ]</b>	<b>Criterios de evaluación</b>
Benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )	Anual	2	Media aritmética anual
Dióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ )	24 horas	250	NE más de 7 veces al año
Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )	1 hora	200	NE más de 24 veces al año
	Anual	100	Media aritmética anual
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras ( $\text{PM}_{2,5}$ )	24 horas	50	NE más de 7 veces al año
	Anual	25	Media aritmética anual
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras ( $\text{PM}_{10}$ )	24 horas	100	NE más de 7 veces al año
	Anual	50	Media aritmética anual
Mercurio Gaseoso Total (Hg)	24 horas	2	NE: No exceder
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año
	8 horas	10000	Media aritmética móvil
Ozono ( $\text{O}_3$ )	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año
Plomo (Pb) en $\text{PM}_{10}$	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales
Sulfuro de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ )	24 horas	150	Media aritmética

Fuente: Decreto Supremo N°003-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental para Aire [29].

### 2.5.5 Decreto Supremo N°011-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (MINAM - 2017)

Considerando que “el artículo 31° de la Ley N°28611 – Ley General del Ambiente (2005) define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente”.

“Los ECA para suelo constituyen un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, y son aplicables para aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios”.

“De superarse los ECA para Suelo, en aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios, las personas naturales y jurídicas a cargo de estas deben realizar acciones de evaluación y, de ser el caso, ejecutar acciones de remediación de sitios contaminados, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente”.

El presente Decreto Supremo N°011-2017-MINAM contempla las siguientes definiciones:

- “**Contaminante**: Cualquier sustancia química que no pertenece a la naturaleza del suelo o cuya concentración excede la del nivel de fondo susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o el ambiente”.
- “**Remediación**: Tarea o conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas”.
- “**Sitio contaminado**: Aquel suelo cuyas características químicas han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias químicas

contaminantes depositadas por la actividad humana, en concentraciones tal que en función del uso actual o previsto del sitio y sus alrededores represente un riesgo a la salud humana o el ambiente”.

- “**Suelo**: Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad”.

- “**Suelo industrial/extractivo**: Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y/o, la elaboración, transformación o construcción de bienes”.

“Mediante la siguiente norma se derogan el Decreto Supremo N°002-2013-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, y el Decreto Supremo N°003-2014-MINAM, que aprueba la Directiva que establece el procedimiento de adecuación de los instrumentos de gestión ambiental a nuevos Estándares de Calidad Ambiental (ECA)” [30].

**Tabla 2.6: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo**

<b>Parámetros en (mg/kg) peso seco</b>	<b>Usos de Suelo</b>		
	<b>Suelo Agrícola</b>	<b>Suelo Residencial/ Parques</b>	<b>Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivo</b>
<b>Inorgánicos</b>			
Arsénico	50	50	140
Bario total	750	500	2000
Cadmio	1,4	10	22
Cromo total	—	400	1000
Cromo VI	0,4	0,4	1,4
Mercurio	6,6	6,6	24
Plomo	70	140	800
Cianuro libre	0,9	0,9	8

Fuente: Decreto Supremo N°011-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental para Suelo [30].

### 2.5.6 Decreto Supremo N°085-2003-PCM – Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Ruido (2003)

La presente norma establece “los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido y los lineamientos para no excederlos, con el objetivo de proteger la salud, mejorar la calidad de vida de la población y promover el desarrollo sostenible”.

“Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Ruido establecen los niveles máximos de ruido en el ambiente que no deben excederse para proteger la salud humana, tomando en cuenta las zonas de aplicación y horarios” que se establecen en la Tabla 2.7.

Para los efectos de la presente norma se considera:

- **“Barreras acústicas:** Dispositivos que interpuestos entre la fuente emisora y el receptor atenúan la propagación aérea del sonido, evitando la incidencia directa al receptor”.
- **“Contaminación sonora:** Presencia en el ambiente exterior o en el interior de las edificaciones, de niveles de ruido que generen riesgos a la salud y al bienestar humano”.
- **“Decibel (dB):** Unidad adimensional usada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. De esta manera, el decibel es usado para describir niveles de presión, potencia o intensidad sonora”.
- **“Decibel A (dBA):** Unidad adimensional del nivel de presión sonora medido con el filtro de ponderación A, que permite registrar dicho nivel de acuerdo al comportamiento de la audición humana”.
- **“Nivel de presión sonora continua equivalente con ponderación A ( $L_{AeqT}$ ):** Es el nivel de presión sonora constante, expresado en decibeles A, que en el mismo intervalo de tiempo (T), contiene la misma energía total que el sonido medido”.

- “**Ruido**: Sonido no deseado que moleste, perjudique o afecte a la salud de las personas”.
- “**Sonido**: Energía que es transmitida como ondas de presión en el aire u otros medios materiales que puede ser percibida por el oído o detectada por instrumentos de medición”.
- “**Zona de protección especial**: Aquella de alta sensibilidad acústica, que comprende los sectores del territorio que requieren una protección especial contra el ruido, donde se ubican establecimientos de salud, establecimientos educativos, asilos y orfanatos”.
- “**Zona residencial**: Área autorizada por el gobierno local correspondiente para el uso identificado con viviendas o residencias, que permiten la presencia de altas, medias y bajas concentraciones poblacionales”.
- “**Zona comercial**: Área autorizada por el gobierno local correspondiente para la realización de actividades comerciales y de servicios”.
- “**Zona industrial**: Área autorizada por el gobierno local correspondiente para la realización de actividades industriales” [31].

**Tabla 2.7: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido**

Zonas de aplicación	Valores expresados en $L_{AeqT}$ (dB)	
	Horario diurno (07:01 – 22:00 horas)	Horario nocturno (22:01 – 07:00 horas)
Zona de Protección Especial	50	40
Zona Residencial	60	50
Zona Comercial	70	60
Zona Industrial	80	70

Fuente: Decreto Supremo N°011-2003-PCM – Reglamento de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido [31].

### **2.5.7 Decreto Supremo N°005-2012-TR – Reglamento de la Ley N°29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo (MTPE - 2012)**

La Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, tiene como objetivo “promover una cultura de prevención de riesgos laborales en el país sobre la base de la observancia del deber de prevención de los empleadores, el rol de fiscalización y control del Estado y la participación de los trabajadores y sus organizaciones sindicales, quienes a través del diálogo social, velan por la promoción, difusión y cumplimiento de la normativa sobre la materia”.

“La presente Ley es aplicable a todos los sectores económicos y de servicios, comprende a todos los empleadores y los trabajadores bajo el régimen laboral de la actividad privada en todo el territorio nacional, trabajadores y funcionarios del sector público. También se incluye a todo aquel que, sin prestar servicios, se encuentre dentro del lugar de trabajo, y trabajadores por cuenta propia, en los que le resulte aplicable”.

“Artículo 25° - El empleador debe implementar el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo, regulado en la Ley y en el presente Reglamento, en función del tipo de empresa u organización, nivel de exposición a peligros y riesgos, y la cantidad de trabajadores expuestos”.

Artículo 26° - El empleador está obligado a:

- “Garantizar que la seguridad y salud en el trabajo sea una responsabilidad conocida y aceptada en todos los niveles de la organización”.
- “Definir y comunicar a todos los trabajadores, cuál es el departamento o área que identifica, evalúa o controla los peligros y riesgos relacionados con la seguridad y salud en el trabajo”.
- “Disponer de una supervisión efectiva, según sea necesario, para asegurar la protección de la seguridad y la salud de los trabajadores”.
- “Promover la cooperación y la comunicación entre el personal, incluidos los trabajadores, sus representantes y las organizaciones sindicales, a fin

de aplicar los elementos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo en la organización en forma eficiente”.

- “Establecer, aplicar y evaluar una política y un programa en materia de seguridad y salud en el trabajo con objetivos medibles y trazables”.
- “Adoptar disposiciones efectivas para identificar y eliminar los peligros y los riesgos relacionados con el trabajo y promover la seguridad y salud en el trabajo”.
- “Establecer los programas de prevención y promoción de la salud y el sistema de monitoreo de su cumplimiento”.
- “Proporcionar los recursos adecuados para garantizar que las personas responsables de la seguridad y salud en el trabajo, incluido el Comité de Seguridad y Salud en el Trabajo o el Supervisor de Seguridad y Salud en el Trabajo, puedan cumplir los planes y programas preventivos establecidos”.

“Artículo 28° - La capacitación, cualquiera que sea su modalidad, debe realizarse dentro de la jornada de trabajo. La capacitación puede ser impartida por el empleador, directamente o través de terceros. En ningún caso el costo de la formación recae sobre los trabajadores, debiendo ser asumido íntegramente por el empleador”.

Para efectos del contenido de la Ley N°29783 – Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, y el presente Reglamento se aplican las siguientes definiciones:

- **“Capacitación:** Actividad que consiste en transmitir conocimientos teóricos y prácticos para el desarrollo de competencias, capacidades y destrezas acerca del proceso de trabajo, la prevención de los riesgos, la seguridad y la salud”.
- **“Control de riesgos:** Es el proceso de toma de decisiones basadas en la información obtenida en la evaluación de riesgos. Se orienta a reducir los

riesgos a través de la propuesta de medidas correctivas, la exigencia de su cumplimiento y la evaluación periódica de su eficacia”.

- “**Cultura de seguridad o cultura de prevención:** Conjunto de valores, principios y normas de comportamiento y conocimiento respecto a la prevención de riesgos en el trabajo que comparten los miembros de una organización”.

- “**Enfermedad profesional u ocupacional:** Es una enfermedad contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo relacionadas al trabajo”.

- “**Equipos de Protección Personal (EPP):** Son dispositivos, materiales e indumentaria personal destinados a cada trabajador para protegerlo de uno o varios riesgos presentes en el trabajo y que puedan amenazar su seguridad y salud. Los EPP son una alternativa temporal y complementaria a las medidas preventivas de carácter colectivo”.

- “**Evaluación de riesgos:** Es el proceso posterior a la identificación de los peligros, que permite valorar el nivel, grado y gravedad de los mismos proporcionando la información necesaria para que el empleador se encuentre en condiciones de tomar una decisión apropiada sobre la oportunidad, prioridad y tipo de acciones preventivas que debe adoptar”.

- “**Identificación de Peligros:** Proceso mediante el cual se localiza y reconoce que existe un peligro y se definen sus características”.

- “**Riesgo:** Probabilidad de que un peligro se materialice en determinadas condiciones y genere daños a las personas, equipos y al ambiente”.

- “**Riesgo Laboral:** Probabilidad de que la exposición a un factor o proceso peligroso en el trabajo cause enfermedad o lesión” [32].



## **2.6 LA EMPRESA: COMPAÑÍA ECOLÓGICA GW SAC**

Compañía Ecológica GW SAC es una mediana empresa que fue creada en enero del año 2012 para desarrollar la actividad del reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), inicialmente producía hojuelas sucias de PET reciclado y las comercializaba a empresas del mercado interno que contaban con Líneas de Lavado de hojuelas de PET reciclado. A finales del año 2015 adquiere una Línea de Lavado de hojuelas de PET y otra Línea de Lavado de hojuelas de PP/PEBD para mejorar y consolidarse en el proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo.

La empresa se encuentra ubicada en Asociación de Propietarios Casa Huerta San Pedro, Mz. E, Lotes 14 y 15, distrito de Puente Piedra, departamento y provincia de Lima, y dispone del área total de 3 000 m<sup>2</sup> para el desarrollo de sus actividades.

El total de las actividades de la empresa está dirigida a la producción de hojuelas de PET reciclado, hojuelas de PP reciclado y hojuelas de PEBD reciclado. El 70 % de las hojuelas de PET reciclado es para la exportación al mercado de Estados Unidos de Norteamérica, Irlanda y China; y el 30% restante es para la industria del mercado interno. Las hojuelas de PP reciclado y las hojuelas de PEBD reciclado son comercializadas a diferentes industrias del mercado local.

### **- Misión**

Somos una empresa dedicada a producir hojuelas de plásticos reciclados de alta calidad a partir de los envases PET post-consumo; que satisfacen los requerimientos de nuestros clientes.

### **- Visión**

Ser reconocida por nuestros clientes como una empresa que preserva el medio ambiente de manera responsable, con un crecimiento continuo, comprometida con el desarrollo del país.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El tipo de investigación es descriptivo y relacional porque se recolectan datos y se miden con base a la medición estadística; sobre el proceso productivo, para luego describir la realidad, someterla a un análisis y finalmente mostrar resultados relacionados con los objetivos trazados.

Se realizará un análisis detallado del proceso productivo, la forma cómo se realizan, la materia prima que usan y de qué forma la usan, luego se procederá a determinar qué residuos, efluentes y emisiones se generan en el proceso productivo y los posibles manejos por hacer para minimizar sus efectos en el ambiente.

El paso a seguir es implementar un programa de Producción Más Limpia en la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), de la empresa Compañía Ecológica GW SAC, para la mejora productiva y ambiental; en esta fase se definirán los requerimientos técnicos y económicos necesarios para el programa de Producción Más Limpia (PML).

##### **3.1.1 Investigación Descriptiva**

Este tipo de estudio permitirá analizar adecuadamente cómo se implementará y qué impacto tendrá el programa de PML en el proceso productivo. Asimismo, se puede decir que será descriptiva porque se requiere información sobre el área y actividad analizada, con la cual se obtendrán datos importantes relacionados con el problema planteado. Posteriormente se evaluará la información con base a los objetivos

trazados, dentro del estudio se seleccionarán y describirán una serie de cuestionamientos con el fin de establecer conclusiones y recomendaciones.

### **3.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Para la obtención de los datos necesarios en el presente estudio se utilizarán las siguientes fuentes:

#### **3.2.1 Fuentes de Información Primaria y Secundaria**

Fuentes primarias: se desarrollarán reuniones con personas responsables del funcionamiento de la planta con el fin de ilustrar sobre todos los procesos que allí se realizan y evaluar la generación de residuos, efluentes y emisiones.

Fuentes secundarias: se realizará la consulta de fuentes de información, relacionadas con el proceso productivo, la implementación de PML en otras empresas, información relacionada con impacto ambiental causadas por empresas del sector de reciclaje de envases PET post-consumo.

### **3.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

De acuerdo al tipo de investigación a desarrollar, la información recolectada del proceso productivo será seleccionada y organizada con el fin de interpretar y relacionar los datos obtenidos con los objetivos trazados [33].

### **3.4 METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**

Para el desarrollo del presente programa de Producción Más Limpia en una planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno); de la empresa Compañía Ecológica

GW SAC, se seguirá la metodología que plantea la “**Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia**” [23].

“La implementación de un programa de Producción Más Limpia (PML) en una empresa es un proceso compuesto de 5 etapas”:

#### **3.4.1 Primera Etapa: Planeamiento y Organización**

“Esta etapa comprende las siguientes actividades:

- Involucrar y obtener el compromiso de la Alta Dirección
- Establecer el Comité de Producción Más Limpia
- Definir objetivos generales
- Elaborar el cronograma de actividades
- Identificar limitaciones y alternativas de solución”.

#### **3.4.2 Segunda Etapa: Diagnóstico de Producción Más Limpia**

“Esta etapa comprende las siguientes actividades:

- Recopilar información sobre los procesos y servicios
- Definir y evaluar las actividades de la organización
- Enfocar el trabajo del Comité de Producción Más Limpia en las áreas prioritarias de la organización
- Elaboración de balances de materiales y de energía para las operaciones o procesos unitarios y actividades prioritarias
- Definir las causas de los flujos de contaminantes y de las ineficiencias
- Desarrollar oportunidades de Producción Más Limpia
- Pre-seleccionar las opciones generadas de Producción Más Limpia”.

### **3.4.3 Tercera Etapa: Estudio de Factibilidad**

“Esta etapa comprende las siguientes actividades:

- Evaluación preliminar
- Evaluación técnica
- Evaluación económica
- Evaluación ambiental
- Seleccionar oportunidades factibles”.

### **3.4.4 Cuarta Etapa: Implementación y Seguimiento de las oportunidades de Producción Más Limpia**

“Esta etapa comprende las siguientes actividades:

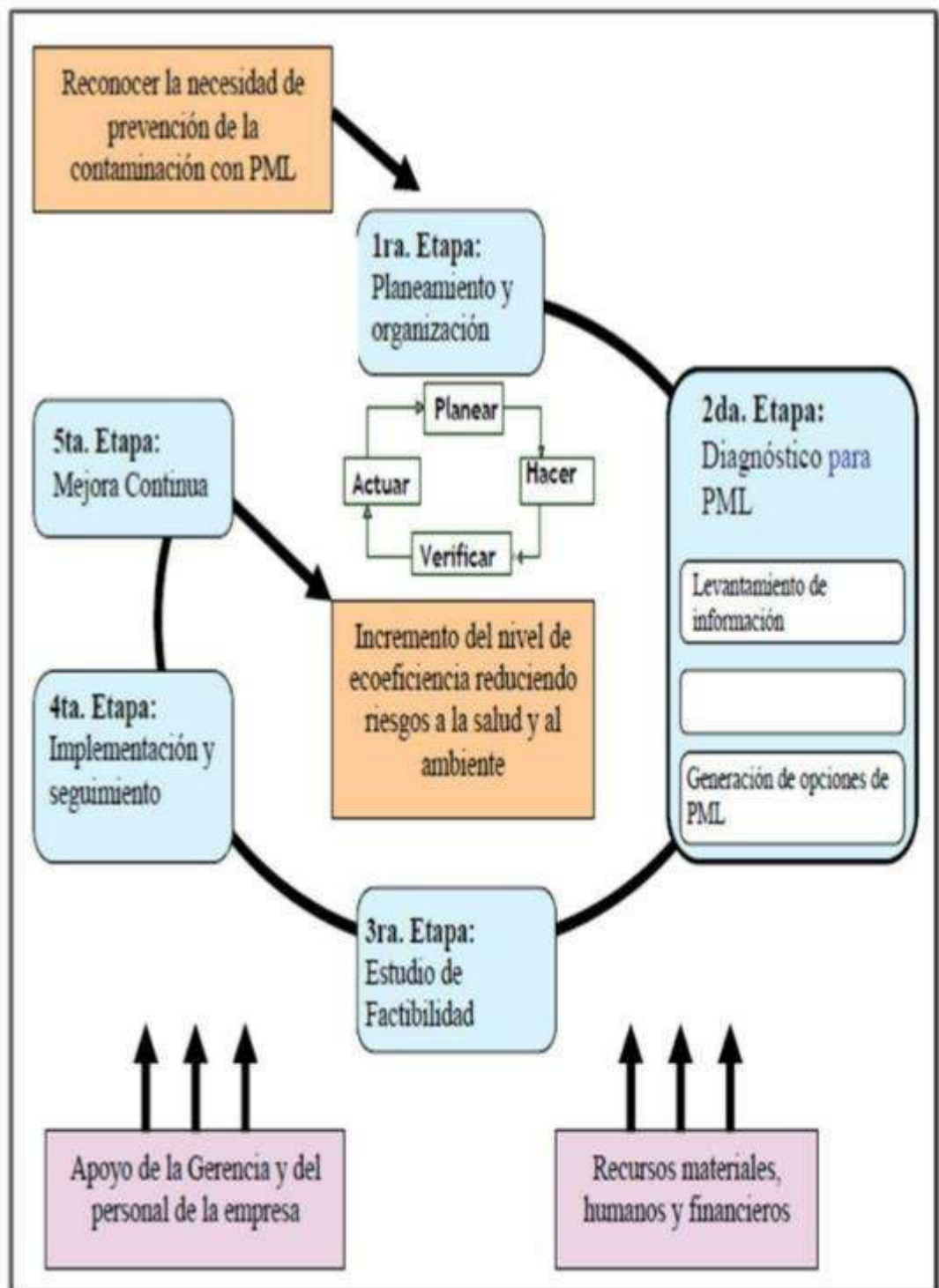
- Obtención de fondos
- Preparar el Plan de Acción de Producción Más Limpia
- Implantar las oportunidades de Producción Más Limpia
- Supervisar y evaluar el avance”.

### **3.4.5 Quinta Etapa: Mejora Continua**

“Esta etapa comprende la siguiente actividad:

- Mantener las actividades de Producción Más Limpia” [23].

En la Figura 3.1 se muestra las etapas de implementación de un programa de Producción Más Limpia.



**Figura 3.1: Etapas de la implementación de Producción Más Limpia**

Fuente: “Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia” [23].

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DEL PROGRAMA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**

#### **4.1 PRIMERA ETAPA: PLANEAMIENTO Y ORGANIZACIÓN**

##### **4.1.1 Compromiso del Directorio**

El Directorio de la empresa “Compañía Ecológica GW SAC” se compromete a ser la fuerza impulsora para la implementación del programa de Producción Más Limpia en la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno); para tal finalidad constituye el Comité de Producción Más Limpia.

##### **4.1.2 Comité de Producción Más Limpia**

El Comité de Producción Más Limpia estará conformado por:

###### **A. Gerente General**

Funciones:

- Coordinar las actividades del programa de Producción Más Limpia (PML).
- Enlazar al Comité de PML y a todo el personal de la empresa.
- Atribuirse la responsabilidad del programa de PML.

###### **B. Jefe de Planta**

###### **C. Jefe de Mantenimiento**

###### **D. Jefe de control de Calidad**

Funciones:

- Capacitar al personal de la empresa en Producción Más Limpia.
- Establecer el plan de diagnóstico de Producción Más Limpia.

- Ejecutar el diagnóstico de Producción Más Limpia.
- Generar las oportunidades de Producción Más Limpia.
- Realizar el estudio de factibilidad de las oportunidades de Producción Más Limpia.

#### **4.1.3 Objetivos generales**

Entre los objetivos generales que se plantean se tiene:

- Incrementar la productividad.
- Disminuir efectos negativos en la salud de los trabajadores.
- Optimizar las condiciones de operación y proceso.
- Reducir los costos de consumo de materias primas, insumos y energía.
- Reducir costos en la disposición final de desechos.
- Reducir la cantidad de residuos, efluentes y emisiones generadas.
- Adecuarse a la legislación vigente, con enfoque en la legislación ambiental.

#### **4.1.4 Cronograma de actividades para implementar el programa de Producción Más Limpia**

El cronograma de actividades que se muestra en la Tabla 4.1 permitirá controlar los avances que se van logrando durante la implementación del programa de Producción Más Limpia.



**Tabla 4.1: Cronograma de actividades para implementar el programa de Producción Más Limpia**

Actividades	Mes														Productos
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	19		
1. “Sensibilización y capacitación en Producción Más Limpia (PML)” ( 2 horas/mes )														Capacitación del personal	
2. “Diagnóstico de Producción Más Limpia – Recopilación de información” ( 6 días )														Plan de Diagnóstico	
3. “Diagnóstico de Producción Más Limpia – Trabajo de campo” ( 6 días )														Informe de Diagnóstico	
4. “Elaboración y presentación del Informe Final” ( 4 semanas )															
5. “Implementación de oportunidades factibles de PML” ( 5 meses )														Incremento de la Productividad y mejora del Desempeño Ambiental	
6. “Seguimiento de oportunidades factibles de Producción Más Limpia”														Reporte de Seguimiento	
7. “Elaboración y presentación de Informe de Seguimiento de PML															

Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.5 Limitaciones para la implementación del programa de Producción Más Limpia y sus alternativas de solución.**

La implementación de un programa de Producción Más Limpia requerirá de inversión económica, personal calificado y predisposición del Directorio de la empresa que permita un desarrollo exitoso; por consiguiente, se evaluarán estos aspectos y se propondrá alternativas de solución en los casos que se requieran.

A continuación se describen las limitaciones y las alternativas de solución propuestas:

##### **- Factor del personal**

Existe una actitud pesimista del personal ante los cambios en los procesos de producción, el personal de la empresa suele reaccionar de manera negativa frente a cambios en la forma de trabajo.

Además, se desconoce sobre los beneficios y ventajas de implementar un programa de Producción Más Limpia. A pesar de contar con personal identificado con la empresa, si éstos no conocen los beneficios, se mostrarán reacios a los cambios.

Por lo tanto, se propone la capacitación y sensibilización del personal sobre la metodología y los beneficios que se pretende conseguir con la implementación del programa de PML, los cuales beneficiarán a todos los integrantes de la empresa. Esta capacitación se debe realizar en charlas programadas a lo largo de la implementación y ejecución del programa de PML.

##### **- Factor de tecnología**

Actualmente en el sector de reciclaje de plástico en el Perú no existe una oferta de tecnología especializada al alcance de una mediana empresa. Ante esta situación, se deberá identificar tecnologías que se usan en plantas más modernas y consultar a organizaciones que promuevan

tecnologías de procesos en reciclaje de plásticos post-consumo y adaptarlas a las posibilidades de la empresa.

#### **- Factor de financiamiento**

El financiamiento de los cambios propuestos, dependiendo de las modificaciones que se planteen, podría ser un limitante.

Ante este escenario, se propone la búsqueda de financiamiento en entidades financieras, sabiendo que la inversión se recuperará con la implementación del programa de Producción Más Limpia.

## **4.2 SEGUNDA ETAPA: DIAGNÓSTICO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**

Este diagnóstico permitirá recopilar información del proceso productivo que se desarrolla en la empresa, la cual permitirá identificar flujos de contaminantes y de las ineficiencias, para luego proponer oportunidades de Producción Más Limpia.

### **4.2.1 Mapa de Procesos**

Según la *Guía Peruana GP 900.200:2007*, señala que “el Mapa de Procesos impulsa a la organización a poseer una visión más allá de sus límites geográficos y funcionales, mostrando cómo sus actividades están relacionadas con los clientes externos, proveedores y grupos de interés”.

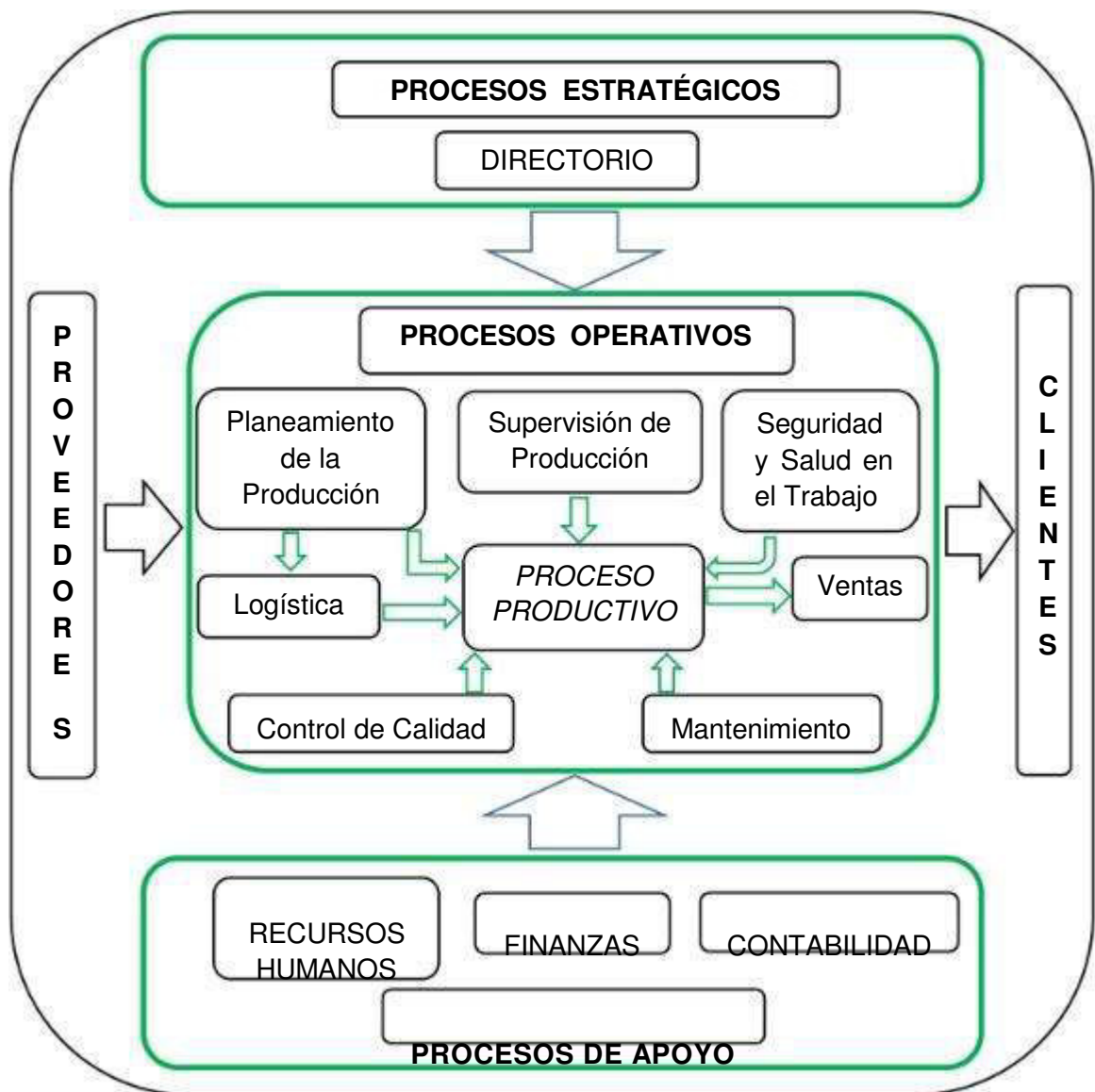
En las empresas los procesos se clasifican en:

- **“Estratégicos:** procesos destinados a definir y controlar las metas de la organización, sus políticas y estrategias. Estos procesos son gestionados por la Alta Dirección en su conjunto”.
- **“Operativos:** procesos destinados a llevar a cabo las acciones que permiten desarrollar las políticas y estrategias definidas por la organización para dar servicio a los clientes. De estos procesos se

encargan los directores funcionales, que deben contar con la cooperación de los otros directores y de sus equipos humanos”.

- **“De apoyo:** procesos no directamente ligados a las acciones de desarrollo de políticas, pero cuyo rendimiento influye directamente en el nivel de los procesos operativos”.

De acuerdo a la clasificación, en la Figura 4.1 se muestra el Mapa de Procesos de la empresa Compañía Ecológica GW SAC.



**Figura 4.1: Mapa de Procesos de la empresa Compañía Ecológica GW SAC.**  
Fuente: Elaboración propia (2018)

#### 4.2.2 Descripción del Proceso

El proceso productivo consiste en el desarrollo de una serie de etapas, las cuales están definidas como operaciones unitarias, como por ejemplo la molienda, que en su operación permite convertir los envases PET post-consumo (Figura 4.2) en hojuelas de PET reciclado, para su posterior procesamiento en la Línea de Lavado.



**Figura 4.2: Envases PET post-consumo a granel y prensado**

Fuente: Elaboración propia

La empresa produce dentro de sus procesos productivos, a partir de envases PET post-consumo lo siguiente: A) **Hojuelas de PET reciclado**, B) **Hojuelas de PP reciclado** y C) **Hojuelas de PEBD reciclado**.

Para un mejor desarrollo del proceso productivo en la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo; la empresa Compañía Ecológica GW SAC, cuenta con lo siguiente:

- Línea de Molienda de envases PET post-consumo.
- Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.
- Línea de Lavado de hojuelas de PP/PEBD reciclado.
- Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales.

#### 4.2.2.1 Línea de Molienda de envases PET post-consumo

Las operaciones unitarias son las siguientes:

##### A) Selección primaria

En esta etapa ingresan los envases PET post-consumo de bebidas carbonatadas (gasificadas), agua mineral, aceite y otros, provenientes de los centros de acopio, luego mediante una faja transportadora se realiza la separación manual de: envases PET de colores; verde, azul, marrón y otros (Figura 4.3); envases de aceite, envases de PVC, envases PET con etiquetas termoencogibles de PVC, envases PET contaminados con pinturas u otras sustancias, y envases de otros plásticos; dejando ingresar a la siguiente etapa a los envases PET “transparentes o cristal” con sus respectivas tapas y etiquetas.



**Figura 4.3: Envases PET post-consumo seleccionados por color**

Fuente: Elaboración propia

##### B) Separación Trommel

En esta etapa se ingresan los envases PET post-consumo seleccionados a un separador Trommel que consta de una estructura cilíndrica horizontal con pared de plancha perforada de 2 a 4 cm de diámetro de orificios que gira a 15 rpm (Figura 4.4), para separar piedras, metales, arenillas e impurezas; que arrastraron los envases PET hasta su llegada al proceso

productivo. Esta etapa es importante para el cuidado de las cuchillas de los molinos, también para evitar la contaminación de las hojuelas de PET obtenidas en la operación de molienda.



**Figura 4.4: Separador Trommel para envases PET post-consumo**

Fuente: BEIER Machinery Co., Ltd. [34].

### **C) Selección secundaria**

Esta operación se realiza de manera manual en una segunda faja transportadora para asegurar una adecuada selección de envases PET post-consumo transparentes, separando los envases PET de colores, envases PET de aceite, envases de PVC y otros plásticos que no pudieron ser separados en la selección primaria; para ser ingresadas a la operación de molienda.

### **D) Molienda**

En esta etapa, los envases PET post-consumo seleccionados son sometidos a una operación de reducción de tamaño, donde los envases son cortados por cuchillas fijas y móviles de dos molinos (Figura 4.5) ubicados en paralelo, y pasan por sus cribas de descarga respectivas de 15 mm de diámetro de orificios hasta convertirse en hojuelas de PET, PP y PEBD, que son los materiales del cuerpo, tapa y etiqueta; respectivamente, de los envases.



Luego las hojuelas sucias obtenidas (Figura 4.6) son recolectadas por un transportador sinfín y luego transportadas mediante un extractor de aire, hacia la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado. En los molinos de cuchillas la temperatura puede alcanzar los 100°C, la generación de polvo es reprimida por el contenido de restos de líquidos que tienen los envases PET post-consumo, el cual puede representar una merma importante, éstos se evaporan en la molienda y no son aprovechables. Esta área de molienda cuenta con 2 molinos de cuchillas, los cuales se encuentran en una cabina acústica para controlar los niveles de ruido en el ambiente de trabajo, manteniéndolo en 68.2 dB (decibeles) en promedio, según monitoreos realizados en la empresa.



**Figura 4.5: Molino de cuchillas**

Fuente: BEIER Machinery Co., Ltd. [34].



**Figura 4.6: Muestra de hojuelas sucias de PET reciclado**

Fuente: Elaboración propia



#### 4.2.2.2 Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado

Las operaciones unitarias son las siguientes:

##### A) Prelavado

En esta etapa se ingresan las hojuelas de PET, PP y PEBD provenientes de la molienda de envases PET post-consumo, hacia un sistema de cascada (Figura 4.7) que consta de un transportador sinfín de alimentación, un canal con pendiente y particiones escalonadas en serie, por donde fluyen el agua y las hojuelas; y se retienen la arenilla, piedritas y metales. Este sistema cuenta con recirculación de agua, una tina de sedimentación de 2.0 m<sup>3</sup> y un transportador sinfín de escurrimiento que ayuda en la separación de arenilla y refinado de PET que se retiene como sedimento, para hacer más eficiente el lavado de las hojuelas de PET reciclado.



**Figura 4.7: Sistema de cascada para prelavado**

Fuente: Elaboración propia

## B) Flotación

En esta operación se realiza la separación de hojuelas de PET de las hojuelas de PP y PEBD, usando como medio el agua en dos tinajas de flotación (Figura 4.8) de 4 m<sup>3</sup> ubicadas en serie, donde las hojuelas de PET con una densidad específica de 1.39 g/cm<sup>3</sup>, mayor que la densidad específica del agua (1.00 g/cm<sup>3</sup>) se sumergen al fondo y son recogidas por un transportador sinfín que lo lleva a la siguiente operación de centrifugado de prelavado. Los materiales que flotan son las hojuelas de PP y PEBD, cuyas densidades específicas son 0.91 y 0.93 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, que son menores que la densidad específica del agua y son recolectadas por unas paletas “rodillos” que trasladan desde la superficie el material flotante para ser transportadas hacia un colector tipo canastilla para luego ser llevadas a la Línea de Lavado de hojuelas de PP/PEBD reciclado. Se consigue una separación de 90% aproximadamente en la primera tina de flotación, por lo que las hojuelas de PET sumergidas pasan por una segunda tina de flotación consiguiendo en total 95% de separación aproximadamente, el 5% restante consta principalmente de etiqueta pegada la cual será desprendida en la operación unitaria de lavado en caliente a 92°C.



**Figura 4.8: Tina de flotación**

Fuente: Elaboración propia

### **C) Centrifugado de prelavado**

En esta etapa se busca eliminar la humedad de arrastre de las hojuelas de PET provenientes de la tina de flotación, de 13% hasta 4%, además de conseguir un prelavado por la fricción de las paletas con las hojuelas de PET que son golpeadas en el tamiz del cuerpo de la centrifugadora de 2 mm de diámetro de orificios. Luego son enviadas al tanque de lavado en caliente mediante un transportador sinfín.

### **D) Lavado en caliente**

En esta operación las hojuelas de PET con 4% de humedad ingresan al tanque con agitador de 2.2 m<sup>3</sup> de capacidad, que contienen una solución de hidróxido de sodio (soda cáustica) al 1.6% p/v y detergente al 0.9% p/v, a 92°C. En esta etapa se consigue desprender la etiqueta pegada y remover la suciedad adherida a las hojuelas de PET. La descarga de hojuelas de PET se realiza mediante un transportador sinfín acoplado en la base del tanque de lavado (Figura 4.9), esta etapa se realiza en continuo. El combustible empleado para el calentamiento de la solución de lavado es carbón mineral (antracita) en tamaños de 6 a 10 cm, que abastecen al quemador del horno ubicado en la base del tanque de lavado.



**Figura 4.9: Tanque de lavado en caliente**

Fuente: BEIER Machinery Co., Ltd. [34].

### **E) Lavado por fricción**

En esta etapa las hojuelas de PET con 13% de humedad provenientes del tanque de lavado en caliente son recibidas en un tanque con agitador especial de 0.6 m<sup>3</sup> de capacidad, que gira a una velocidad de 350 rpm, la fricción se da entre las hojuelas de PET y las paletas del agitador y entre las hojuelas mismas, con la finalidad de asegurar el desprendimiento de las etiquetas pegadas y la limpieza de las paredes de las hojuelas de PET; esta operación se realiza en continuo.

### **F) Centrifugado de enjuague**

En esta etapa se busca eliminar la humedad de solución de lavado que arrastran las hojuelas de PET provenientes de la lavadora por fricción, para poder recircular la solución retirada al tanque de lavado en caliente, además de conseguir un enjuague por la fricción de las paletas con las hojuelas de PET que son golpeadas en el tamiz del cuerpo de la centrifugadora (Figura 4.10) de 2 mm de diámetro de orificios, consiguiendo también la eliminación de arenilla y refinado de PET como sedimento. Luego, las hojuelas son enviadas a una tina de flotación con función de enjuague mediante un transportador sinfín.



**Figura 4.10: Centrifugadora de enjuague**

Fuente: Elaboración propia



### **G) Enjuague**

Esta operación se realiza en una tina de enjuague (Figura 4.11) de 4 m<sup>3</sup> con la finalidad de enjuagar las hojuelas de PET y a la vez conseguir la separación de las etiquetas de PEBD; que se despegaron de las hojuelas de PET y quedaron libres al pasar por el lavado en caliente a 92°C. Las etiquetas de PEBD que flotan son removidas por un mecanismo de duchas a presión; que funcionan con una bomba de recirculación, que arrastran desde la superficie el material flotante para ser recolectadas. Se consigue una separación de 90% aproximadamente por lo que las hojuelas de PET sumergidas pasan por una segunda tina de enjuague consiguiendo en total el 99.98% aproximadamente de separación.



**Figura 4.11: Tina de enjuague**

Fuente: Elaboración propia

#### **H) Centrifugado de secado**

Esta etapa tiene la finalidad de secado y elimina la humedad de arrastre de las hojuelas de PET provenientes de la segunda tina de enjuague, de 13% hasta 4%, además de conseguir un enjuague por la fricción de las paletas con las hojuelas de PET que son golpeadas en el tamiz del cuerpo de la centrifugadora de 2 mm de diámetro de orificios. Luego son enviadas a la superficie de una faja transportadora.

#### **I) Escogido manual**

Esta etapa se realiza para garantizar una correcta calidad del producto final, donde se escogen manualmente sobre una faja transportadora, las siguientes impurezas: hojuelas PET amarillentas, hojuelas PET de colores, hojuelas PET con etiqueta pegada, etiqueta libre, etc. Luego las hojuelas de PET libre de impurezas (Figura 4.12) continúan hacia una etapa de remolienda mediante un transportador sinfín.



**Figura 4.12: Muestras de impurezas escogidas antes de la remolienda**

Fuente: Elaboración propia

## **J) Remolienda**

En esta etapa, las hojuelas de PET libre de impurezas, que cuentan con un tamaño de 12 a 17 mm son sometidas a una operación de reducción de tamaño por un molino de cuchillas (Figura 4.13), donde las hojuelas son cortadas por cuchillas fijas y móviles, y pasan por una criba de descarga de 10 mm de diámetro de orificios, para obtener hojuelas de 8 a 12 mm; que es el tamaño adecuado para el producto final.

En el molino de cuchillas la temperatura puede alcanzar los 100°C, la generación de polvo es reprimida por el contenido de humedad que contienen las hojuelas de PET y contribuye con el secado de las hojuelas, ingresan con 4% de humedad y salen con 1% aproximadamente de humedad, que está dentro de las especificaciones técnicas del producto final. Luego el producto obtenido es transportado por un extractor de aire hacia la zona de envasado.



**Figura 4.13: Molino de cuchillas en etapa de afilado**

Fuente: Elaboración propia

### **K) Envasado**

En esta etapa final las hojuelas de PET provenientes de la remolienda mediante el extractor de aire, pasan por una tolva ciclón para retirar el polvo de PET que tienen las hojuelas como consecuencia de la remolienda. Luego se envasa en big-bags de 550 kg, 1100 kg o en sacos de 50 kg de capacidad, de acuerdo a los requerimientos del tipo de cliente. Finalmente, el producto terminado (Figura 4.14) es ubicado en el almacén para su venta posterior a nuestros clientes de las industrias de: fibra de poliéster, empaques termoformados y resina tereftálica.



**Figura 4.14: Muestras de hojuelas de PET reciclado (rPET)**

Fuente: Compañía Recicladora SA. [35].

### **4.2.2.3 Línea de Lavado de hojuelas de PP/PEBD reciclado**

Las operaciones unitarias son las siguientes:

#### **A) Lavado por fricción**

En esta etapa se ingresan las hojuelas de PP/PEBD provenientes de las operaciones de flotación y enjuague de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado. Este material es alimentado por lotes de 50 kg aproximadamente a través de un transportador sinfín hacia un tanque con agitador especial de 0.6 m<sup>3</sup> de capacidad, que



gira a una velocidad de 350 rpm, la fricción se da entre las hojuelas de PP/PEBD y las paletas del agitador y entre las hojuelas mismas, y se adiciona 3 litros de una solución de hidróxido de sodio (soda cáustica) al 0.5% p/v y detergente al 0.5% p/v, con la finalidad de remover la suciedad de las paredes de las hojuelas. Esta operación tiene un tiempo de 3 minutos en la lavadora por fricción y se realiza a temperatura del ambiente.

### **B) Flotación**

En esta operación se realiza la separación de hojuelas de PP/PEBD, de las hojuelas de PET que hubiesen sido arrastradas con las hojuelas de PP/PEBD, y de algunas otras impurezas que se hunden en el agua de la tina de flotación (Figura 4.15) de 3 m<sup>3</sup>, donde los materiales que flotan son las hojuelas de PP y PEBD, cuyas densidades específicas son 0.91 y 0.93 g/cm<sup>3</sup>; respectivamente, que son menores que la densidad específica del agua y son recolectadas por unas paletas-rodillos que arrastran desde la superficie el material flotante para ser transportadas hacia la siguiente operación de enjuague. Esta etapa de flotación también contribuye con el enjuague de las hojuelas de PP/PEBD, cuenta con un mecanismo de recirculación de agua.



**Figura 4.15: Tina de flotación con paletas-rodillos**

Fuente: BEIER Machinery Co., Ltd. [34].

### **C) Enjuague**

Esta operación se realiza en un transportador sinfín de escurrimiento, que cuenta con un canal de malla metálica de 2 mm de diámetro de orificios en su base y un sistema de duchas de agua fresca, con la finalidad de enjuagar las hojuelas de PP/PEBD y a la vez conseguir la separación de arenilla y refinado de PP/PEBD.

### **D) Centrifugado de secado**

Esta etapa tiene finalidad de secado y elimina la humedad de arrastre de las hojuelas de PP/PEBD provenientes del transportador de escurrimiento de enjuague, de 10% hasta 4% de humedad, además de conseguir un enjuague por la fricción de las paletas con las hojuelas de PP/PEBD que son golpeadas en el tamiz del cuerpo de la centrifugadora (Figura 4.16) de 2 mm de diámetro de orificios. Luego son enviadas a la operación de secado mediante un transportador sinfín.



**Figura 4.16: Centrifugadora de secado**

Fuente: BEIER Machinery Co., Ltd. [34].

### E) Secado

Esta operación se realiza con aire caliente a 80°C en flujo paralelo con las hojuelas de PP/PEBD, que es alimentado por un dosificador. El flujo de aire caliente es calentado por un balón de Gas Licuado de Petróleo (GLP) de 45 kg de capacidad, en una cabina metálica. El diseño del secador (Figura 4.17) cuenta con un serpentín de ducto de 15 cm de diámetro, el cual con su recorrido de 8 m asegura el secado eficiente de las hojuelas de PP/PEBD, desde 4% hasta 0% de humedad como resultado, que es recolectado en una tolva ciclón para luego alimentar al molino de cuchillas.



**Figura 4.17: Secador de aire caliente**

Fuente: Suzhou Zhongsu Reprocessing Machinery Co., Ltd. [36].

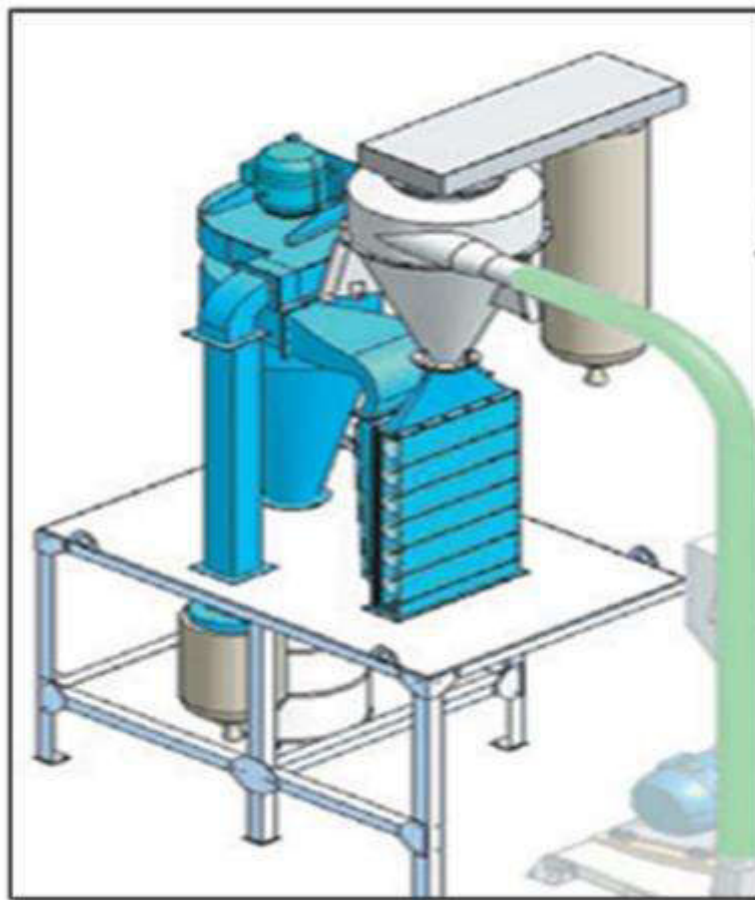
### F) Remolienda

En esta etapa, las hojuelas de PP/PEBD, que cuentan con un tamaño de 12 a 17 mm son sometidas a una operación de reducción de tamaño por un molino de cuchillas, donde las hojuelas son cortadas por cuchillas fijas y móviles, y pasan por una criba

de descarga de 12 mm de diámetro de orificios, para obtener hojuelas de 10 a 14 mm; que es el tamaño adecuado para el producto terminado. Luego son enviadas por un extractor de aire hacia la operación de separación de etiquetas.

### **G) Separación de etiquetas**

Esta operación se realiza mediante un extractor de aire instalado sobre una cabina rectangular de 0.4 m<sup>3</sup>, que cuenta con rendijas en una cara lateral de la cabina (Figura 4.18) que permiten el ingreso de aire para extraer las hojuelas de etiquetas de PEBD y separarlas por un ducto hacia el tope de la cabina, donde son recolectadas por mangas de malla plástica de 1 mm de diámetro de orificios. En la base de la cabina rectangular se recolectan las hojuelas de PP reciclado mediante un transportador sinfín.



**Figura 4.18: Separador de etiquetas**

Fuente: Pagani Dycomet SA. [37].

## H) Envasado

En esta etapa final las hojuelas de PP reciclado (Figura 4.19) son envasadas en sacos de 50 kg de capacidad, y las hojuelas de PEBD reciclado en sacos de 20 kg de capacidad; como requieren los clientes. Finalmente, los productos terminados son ubicados en el almacén para su venta posterior a nuestros clientes de la industria de calaminas, envases y mangas de plástico.



**Figura 4.19: Muestras de hojuelas de PP y PEBD reciclados**

Fuente: Elaboración propia

### 4.2.2.4 Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales

El Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales de la empresa Compañía Ecológica GW SAC tiene una capacidad de tratamiento de 64 litros por minuto. Este caudal es captado de los canales de aguas residuales de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado.

Con este Sistema de Tratamiento Primario se logran niveles de remoción hasta 95% de material sedimentable; principalmente inorgánicos, y 100% de material flotable. De esta manera el agua tratada es descargada al sistema de alcantarillado sanitario, mediante una electrobomba sumergible cuyo caudal es 4.0 litros por segundo.



El Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales dispone de lo siguiente:

#### **A) Cámara de rejas**

Se cuenta con un sistema de rejas de 30 mm de separación entre barras. En esta unidad se retienen los materiales sólidos grandes que pudieran ser arrastrados por las aguas residuales (bolsas, envases, sacos usados, restos de madera, etc.). Estos materiales son almacenados en un contenedor adecuado para su posterior disposición.

#### **B) Trampa de finos y lodos**

En esta unidad se remueven material grueso que son arrastrados por las aguas residuales. La Trampa de finos y lodos (Figura 4.20) cuenta con tres compartimientos, y tiene sección trapezoidal que altera el curso y facilita la retención de partículas con diámetro mayor a 1.0 mm y otras partículas sedimentables predominantemente inorgánicas.



**Figura 4.20: Trampa de finos y lodos**

Fuente: Elaboración propia

### **C) Canal de rejillas**

Este canal de 10 m de largo de sección rectangular; está compuesto por una secuencia de 4 rejillas tipo tamiz de 8 mm de diámetro y 4 rejillas de 2 mm de diámetro de orificios, distribuidos simétricamente, donde se consigue la retención de material flotable.

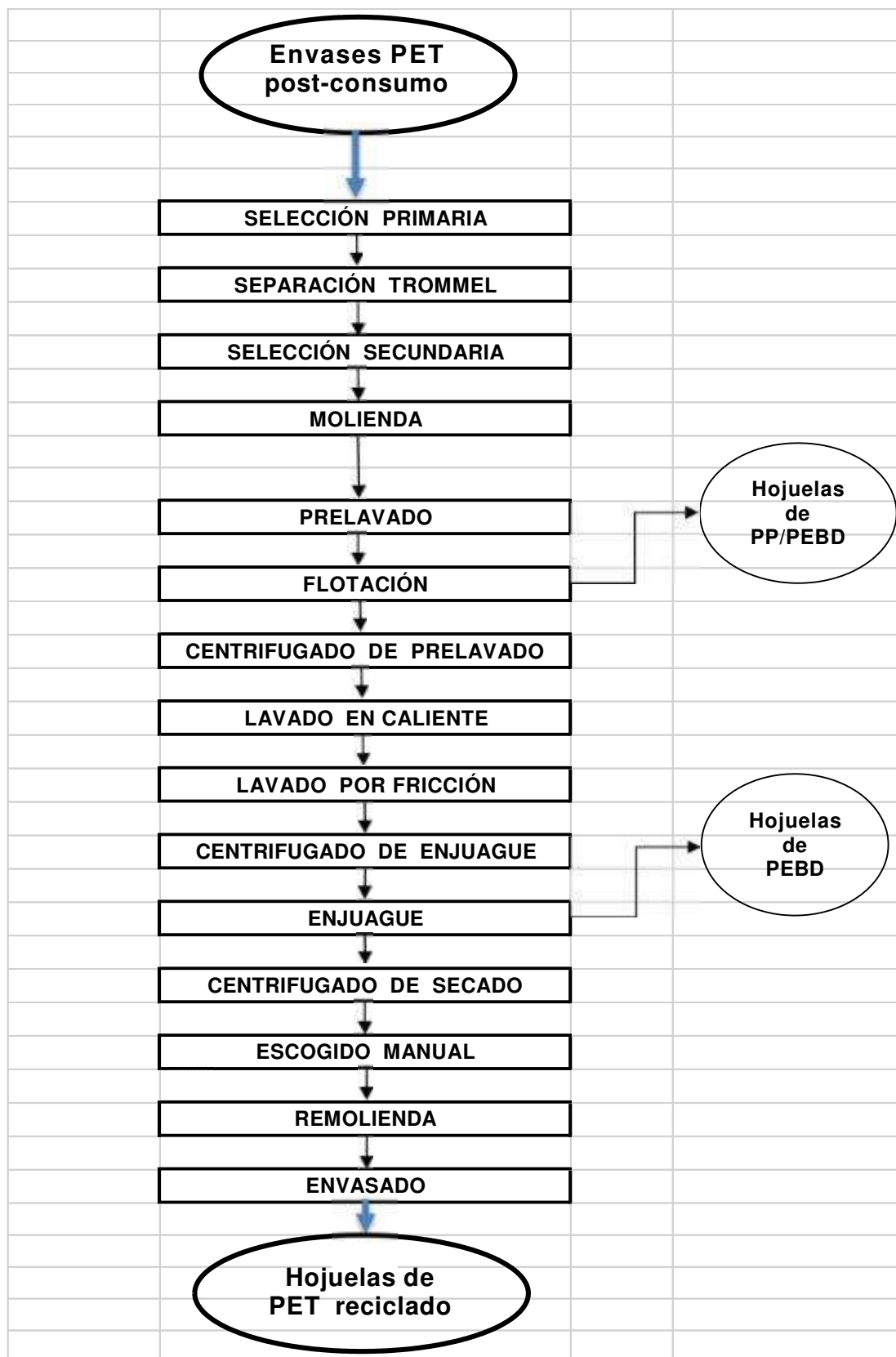
### **D) Sedimentador primario**

Esta unidad se ha diseñado con el propósito de remover material fino; compuesto por plástico remolido (refinado) y arenillas en diámetros de 1.0 mm hasta 2.0 mm. Está conformada por una sección trapezoidal de 25 m<sup>3</sup> de capacidad que facilita la retención y estabilización de material sedimentable. Después de un tiempo de sedimentación de 8 horas, el agua tratada es bombeada por una electrobomba sumergible, de caudal de 4.0 litros por segundo, que cuenta con una tubería de 3 pulg de diámetro; el cual descarga agua tratada al sistema de alcantarillado sanitario de 6 pulg de diámetro de ingreso, asegurando que no ocurran rebalses o desbordes.

### **4.2.3 Diagramas de flujo**

Los diagramas de flujo consisten en herramientas gráficas que ayudan a comprender ordenadamente el desarrollo del proceso productivo, para posteriormente poder identificar el flujo de contaminantes y generar oportunidades de Producción Más Limpia.

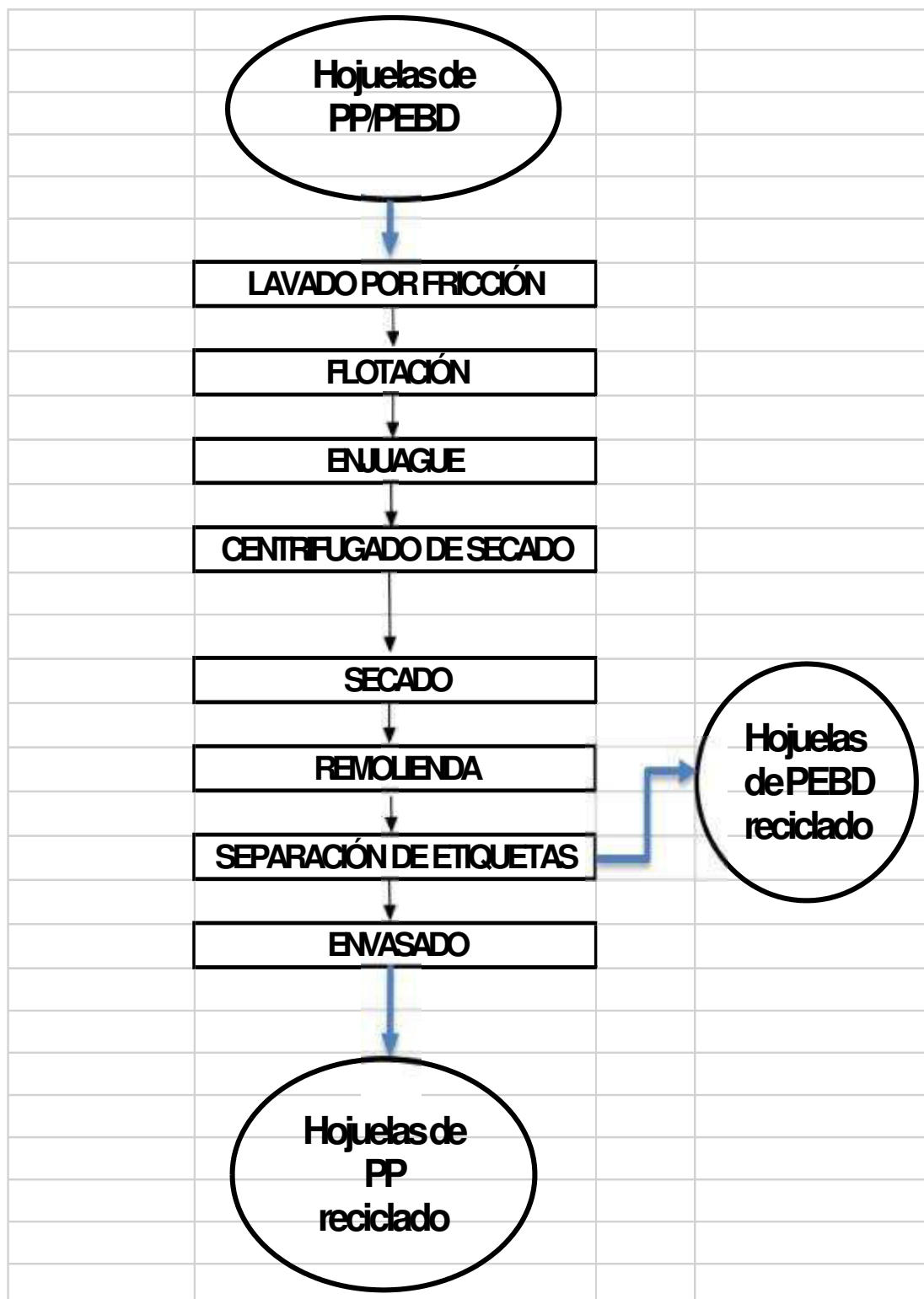
Para el desarrollo de los diagramas de flujo del proceso productivo de la Planta de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo se muestra lo siguiente:



**Figura 4.21: Diagrama de bloques del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

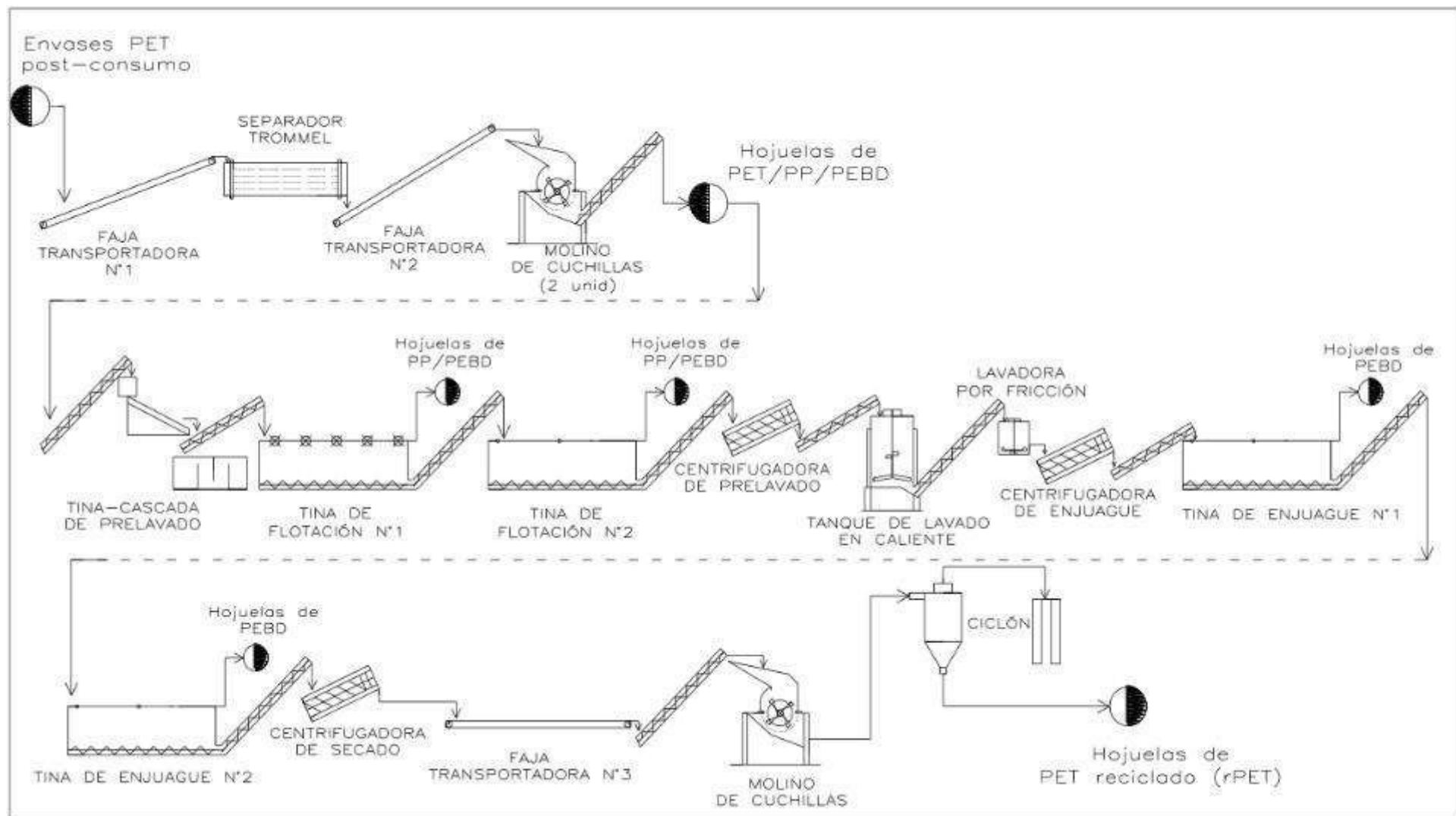
Fuente: Elaboración propia





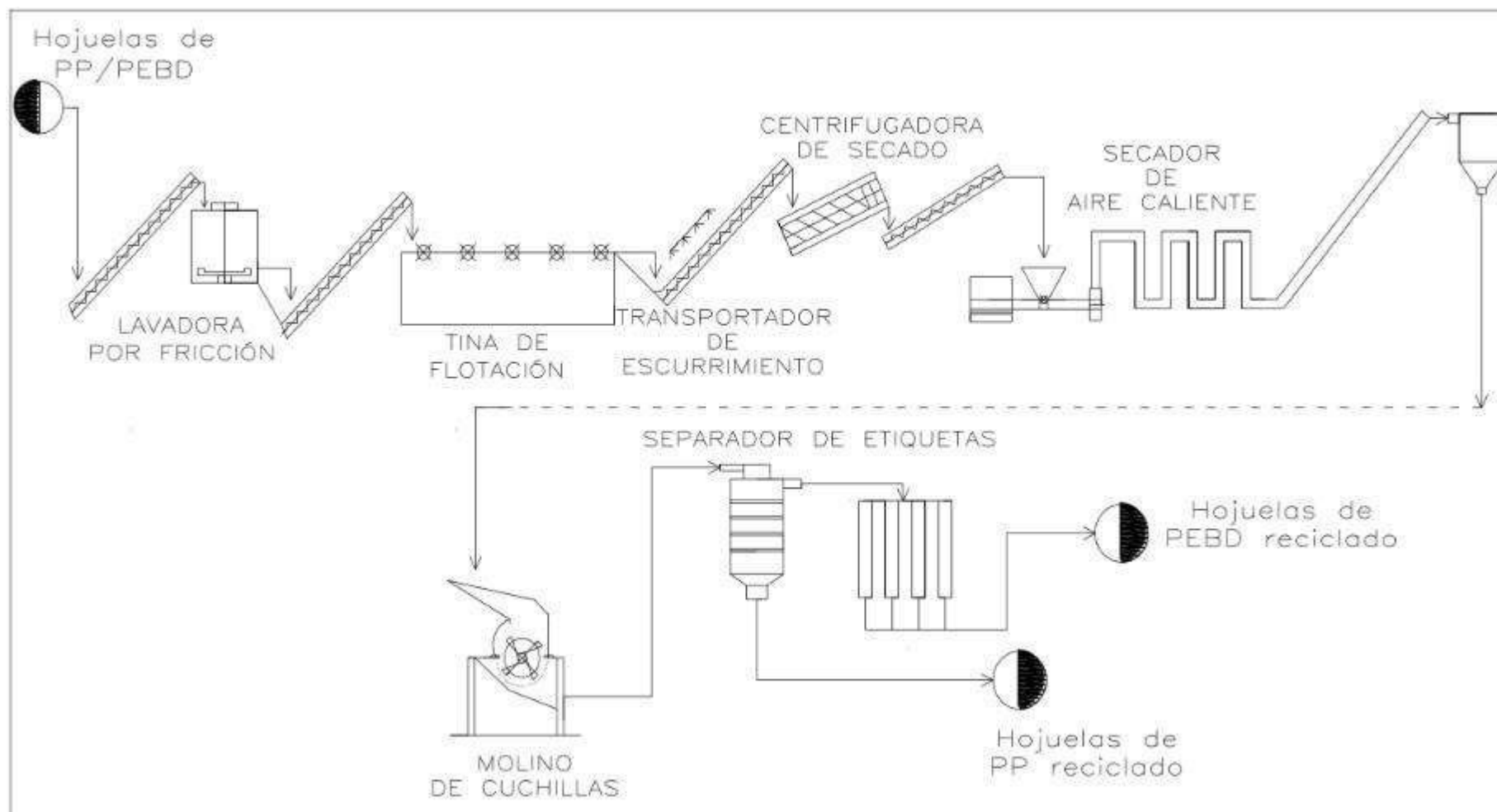
**Figura 4.22: Diagrama de bloques del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.23: Diagrama de flujo del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

Fuente: Elaboración propia (2018)



**Figura 4.24: Diagrama de flujo del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado**

Fuente: Elaboración propia (2018)

#### 4.2.4 Balances de Materia y Energía

##### - Balance de Materia

Para realizar el balance de materia de la Planta de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo se tiene las siguientes consideraciones:

##### ***a) Caracterización de los envases PET post-consumo:***

La procedencia de los envases PET es a partir de los residuos de post-consumo, y en la Tabla 4.2 se muestra la composición promedio de los envases PET post-consumo que se procesan en la empresa Compañía Ecológica GW SAC, donde:

- Los envases tienen residuo líquido del contenido.
- Los envases contienen suciedad: arena, tierra, polvo, etc.
- Se consideran a envases de bebidas carbonatadas (gaseosas), agua mineral, refrescos y otros; no incluyen envases PET de aceite.

**Tabla 4.2: Composición promedio de los envases PET post-consumo**

Parte del envase	Composición*	Porcentaje (%)
Cuerpo	PET	91.3
Tapa y argolla	PP	4.9
Etiqueta	PEBD	1.8
Residuo líquido	Residuo del contenido	1.2
Suciedad	Arena, tierra, polvo, etc.	0.8

\* Nota: En este caso se hace referencia a los envases PET post-consumo cristal, celeste, verde, azul y marrón; no incluyen envases PET post-consumo de aceite.  
Fuente: Elaboración propia

Además, se tiene que considerar que los envases PET post-consumo ingresan a la línea de reciclaje mecánico por separado, clasificados principalmente por colores.

**Tabla 4.3: Clasificación de los envases PET post-consumo**

<b>Tipo de envase PET post-consumo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
PET transparente o cristal	84.0
PET celeste	2.0
PET azul	1.5
PET verde	4.5
PET marrón, otros.	1.0
PET aceite	7.0

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del reciclaje mecánico de envases PET post-consumo de aceite se presenta las siguientes características:

**Tabla 4.4: Composición promedio de los envases PET post-consumo de aceite**

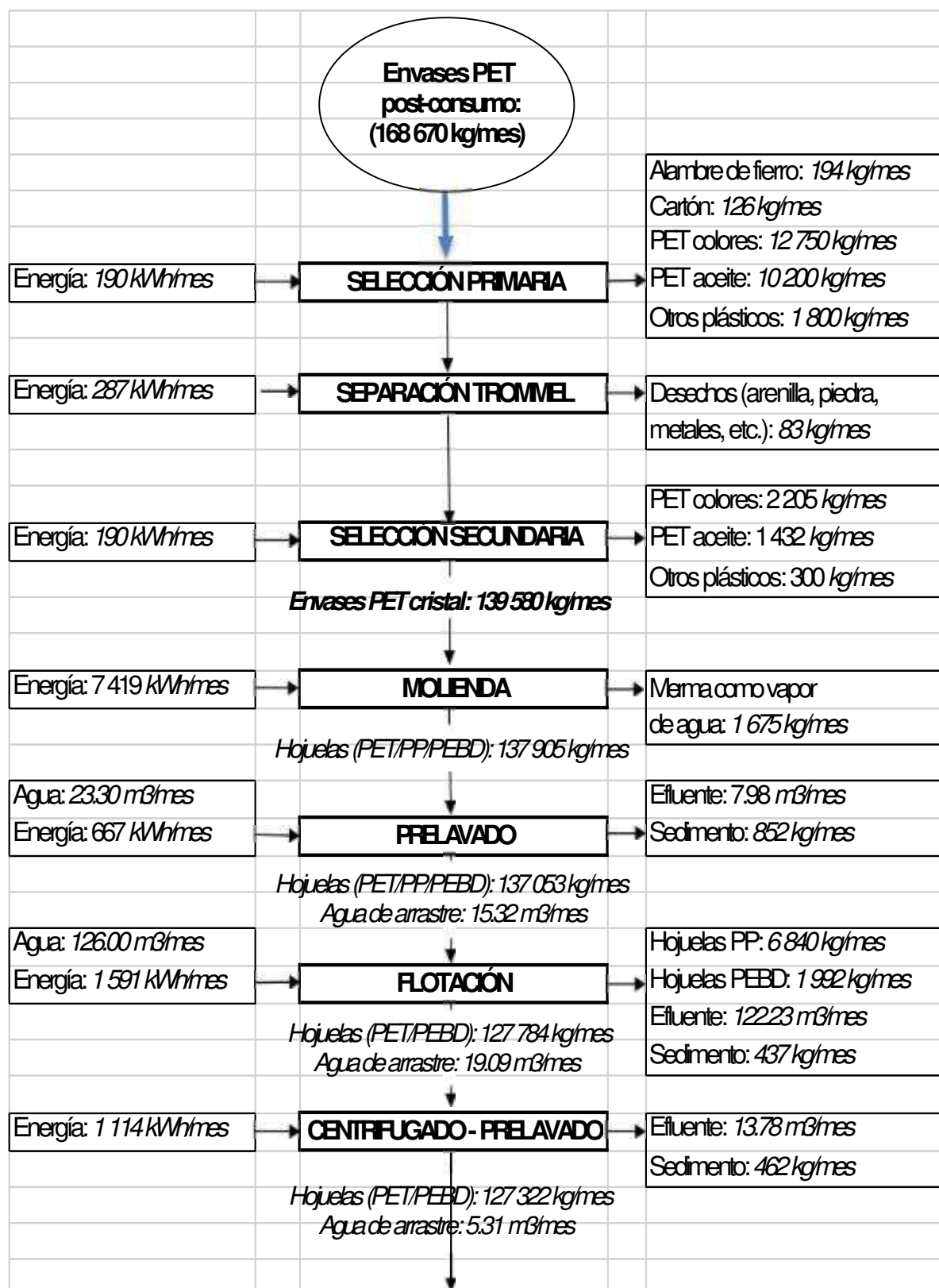
<b>Parte del envase</b>	<b>Composición</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Cuerpo	PET	91.5
Tapa y argolla	PEAD	4.2
Etiqueta*	PEBD	2.0
Residuo líquido y suciedad	Aceite, arena, tierra, etc.	2.3

\* Nota: En este caso se considera que hay etiquetas de papel en un 20% respecto del total de etiquetas en los envases PET post-consumo de aceite.

Fuente: Elaboración propia

***b) Condiciones de operación de la Planta de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo de la empresa Compañía Ecológica GW SAC:***

- La Planta de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo trabaja 6 días por semana, 26 días por mes, 12 meses al año; la cual cuenta con un programa de mantenimiento preventivo-correctivo, de tal modo que se garantiza la operatividad de sus máquinas y equipos.
- La Línea de Molienda de envases PET post-consumo trabaja en un solo turno de 7:00 a 15:00 horas. Se realiza un afilado de los 2 molinos al final de turno, de tal manera se deja operativo para las labores del siguiente día. La cantidad de hojuelas a partir de la molienda es de 6 647 kg/día, la cual abastece al primer turno de producción en la línea de lavado de hojuelas de envases PET post-consumo.
- La Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado trabaja en dos turnos: 1er. Turno de 07:00 a 15:00 horas, y 2do. Turno de 15:00 a 23:00 horas.
- En el primer turno se lavan las hojuelas provenientes de la molienda propia de envases PET post-consumo a granel y prensado, provenientes de Lima (149 TM/mes) y Ancash (20 TM/mes) aproximadamente; obteniendo la calidad Superior.
- En el segundo turno se lavan las hojuelas de PET reciclado provenientes de la compra a nuestros proveedores estratégicos, que principalmente son del interior del país, tales como: Arequipa (66 TM/mes), Ica (25 TM/mes), Ancash (9 TM/mes), La Libertad (52 TM/mes) y Piura (15 TM/mes) aproximadamente; obteniendo la calidad Estándar. La cantidad de alimentación de hojuelas de PET es de 6 670 kg/turno aproximadamente.
- El cambio de las aguas de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado se realiza al finalizar los dos turnos de producción; ingresando al sistema de tratamiento primario de aguas residuales.

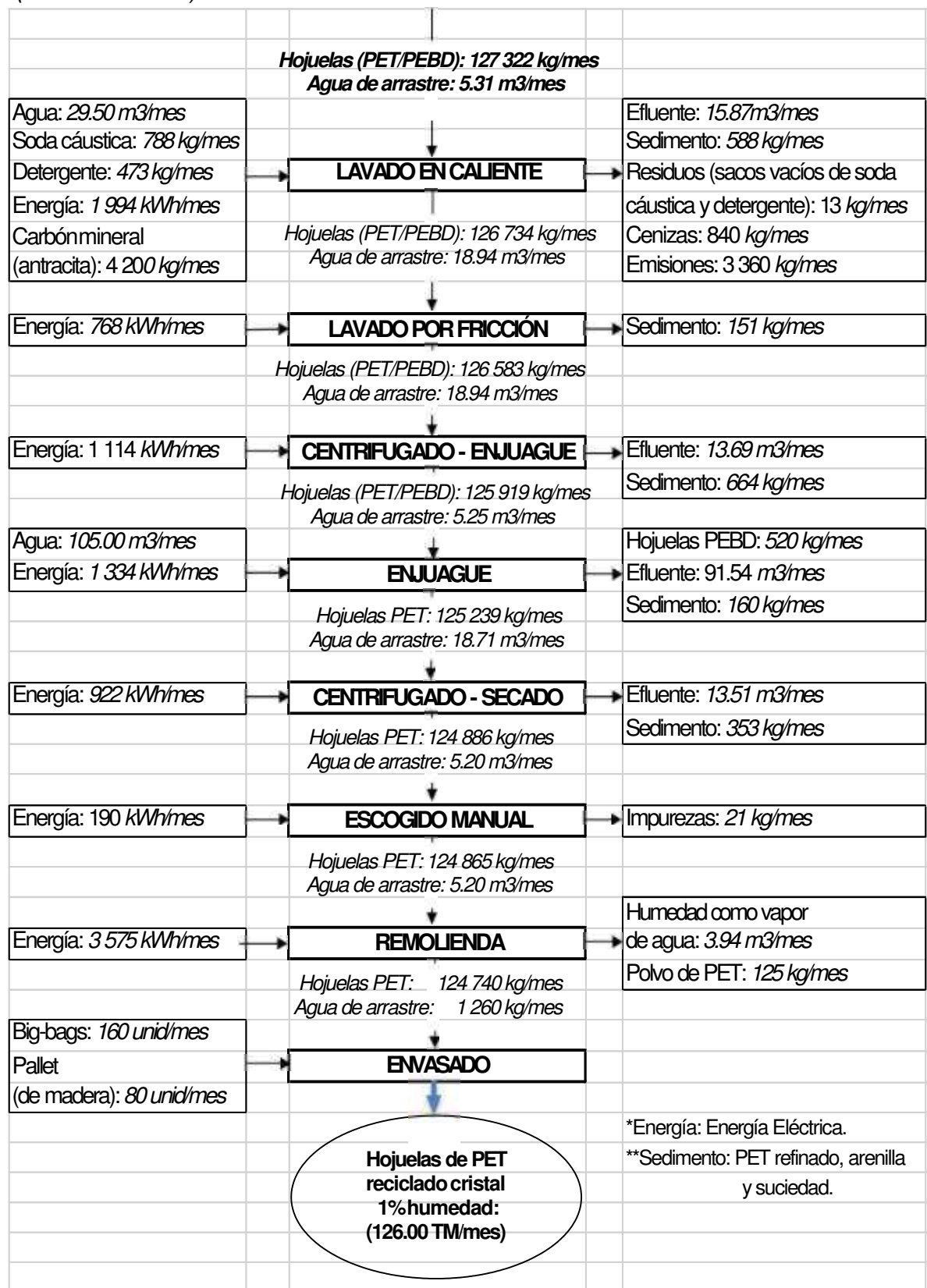


**Figura 4.25: Diagrama de flujo de materiales y energía del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

Fuente: Elaboración propia

(...continúa)

(...continuación)



**Figura 4.25: Diagrama de flujo de materiales y energía del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 4.5: Resultados del balance de materia del Proceso de Reciclaje  
Mecánico de envases PET post-consumo**

Materiales	Cantidad (kg)	Tipo de envases PET post-consumo (kg)					
		Envase PET cristal	Envase PET celeste	Envase PET azul	Envase PET verde	Envase PET marrón y otros	Envase PET (aceite)
<b>Envases PET post-consumo</b>	<b>168 670</b>						
Alambre de hierro	194						
Cartón	126						
Envases diferentes a PET	2 100						
Piedras y metales	83						
Envases PET cristal	139 580	<b>139 580</b>					
Envases PET celeste	3 323		<b>3 323</b>				
Envases PET azul	2 492			<b>2 492</b>			
Envases PET verde	7 478				<b>7 478</b>		
Envases PET marrón y otros	1 662					<b>1 662</b>	
Envases PET (aceite)	11 632						<b>11 632</b>
Merma como vapor de agua en Molienda		1 675	40	30	90	20	-
Hojuelas de PP (tapitas)		6 840	163	122	366	81	-
Hojuelas de PEBD (etiquetas)		2 512	60	45	135	30	186
hojuelas de PEAD (tapitas)		-	-	-	-	-	489
Hojuelas de papel (etiquetas)		-	-	-	-	-	47
Sedimento del Prelavado		852	23	17	51	11	110
Sedimento de la Flotación		437	12	9	26	6	60
Sedimento del Centrif. prelavado		462	12	9	27	6	66
Sedimento del Lavado caliente		588	16	12	35	8	168
Sedimento del Lavado fricción		151	4	3	9	2	30
Sedimento del Centrif. enjuague		664	18	13	39	9	180
Sedimento del Enjuague		160	4	3	9	2	23
Sedimento del Centrif. de secado		353	9	7	21	5	34
Impurezas del Escogido manual		21	1	1	1	1	3
Polvo de PET de la Remolienda		125	3	3	6	2	10
<b>Hojuelas de PET reciclado seco</b>		124 740	2 958	2 218	6 663	1 479	10 226
<b>TOTAL (kg)</b>	<b>168 670</b>	<b>139 580</b>	<b>3 323</b>	<b>2 492</b>	<b>7 478</b>	<b>1 662</b>	<b>11 632</b>
<b>% de Humedad en producto final (1 %)</b>		1260	30	22	67	15	103
<b>Hojuelas de PET reciclado (producto final)</b>		<b>126 000</b>	<b>2 988</b>	<b>2 240</b>	<b>6 730</b>	<b>1 494</b>	<b>10 329</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.6: Resultados del balance de materia del Proceso de Lavado de hojuelas de PET reciclado**

Materiales	Cantidad (kg)	Tipo de hojuelas de PET reciclado (kg)					
		Hojuela PET cristal	Hojuela PET celeste	Hojuela PET azul	Hojuela PET verde	Hojuela PET marrón y otros	Hojuela PET (aceite)
<b>Hojuelas de PET reciclado (sucias)</b>	<b>166 750</b>						
Hojuelas de PET cristal	140 070	<b>140 070</b>					
Hojuelas de PET celeste	3 335		<b>3 335</b>				
Hojuelas de PET azul	2 501			<b>2 501</b>			
Hojuelas de PET verde	7 504				<b>7 504</b>		
Hojuelas de PET marrón y otros	1 668					<b>1 668</b>	
Hojuelas de PET (aceite)	11 672						<b>11 672</b>
Costales usados		420	10	8	23	5	70
Hojuelas de PP (tapitas)		6 863	163	123	368	82	-
Hojuelas de PEBD (etiquetas)		2 521	60	45	135	30	187
Hojuelas de PEAD (tapitas)		-	-	-	-	-	490
Hojuelas de papel (etiquetas)		-	-	-	-	-	47
Sedimento del Prelavado		1 276	34	26	77	17	120
Sedimento de la Flotación		693	17	13	39	9	70
Sedimento del Centrifugado de prelavado		462	18	14	41	9	86
Sedimento del Lavado en caliente		882	23	18	53	12	198
Sedimento del Lavado por fricción		227	6	5	14	3	44
Sedimento del Centrifugado de enjuague		996	26	20	59	13	215
Sedimento del Enjuague		240	6	5	14	3	28
Sedimento del Centrifugado de secado		530	14	11	32	7	34
Impurezas del Escogido manual		32	1	1	1	1	3
Polvo de PET de la Remolienda		188	3	3	6	2	10
<b>Hojuelas de PET reciclado seco</b>		124 740	2 954	2 209	6 642	1 475	10 070
<b>TOTAL (kg)</b>	<b>166 750</b>	<b>140 070</b>	<b>3 335</b>	<b>2 501</b>	<b>7 504</b>	<b>1 668</b>	<b>11 672</b>
<b>% de Humedad en producto final (1 %)</b>		1260	30	22	67	15	102
<b>Hojuelas de PET reciclado (producto final)</b>		<b>126 000</b>	<b>2 984</b>	<b>2 231</b>	<b>6 709</b>	<b>1 490</b>	<b>10 172</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.7: Resultados del balance de materia del Proceso de Lavado de hojuelas de PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado**

Materiales	Tipo de subproductos* (kg)			
	PP/PEBD a partir de PET cristal y colores		PEAD/PEBD a partir de PET de aceite	
	Hojuelas PP (tapitas)	Hojuelas PEBD (etiquetas)	Hojuelas PEAD (tapitas)	Hojuelas PEBD (etiquetas)
<b>Hojuelas de PP/PEAD/PEBD reciclado (sucias)</b>	15 171	5 573	979	373
Sedimento del Lavado por fricción	84	20	7	1
Sedimento de la Flotación	42	10	4	1
Sedimento del Enjuague	24	10	4	1
Sedimento del Centrifugado de secado	180	30	15	2
Sedimento en el Secado en caliente	-	-	-	-
Sedimento en la Remolienda	-	-	-	-
Sedimento en Separación de etiquetas	-	-	-	-
Hojuelas de PP reciclado	<b>14 841</b>			
Hojuelas de PEBD reciclado		<b>5 503</b>		
Hojuelas de PEAD reciclado tapitas ac			<b>949</b>	
Hojuelas de PEBD reciclado etiquetas ac				<b>368</b>
<b>Total (kg)</b>	15 171	5 573	979	373

\*Ésta es la producción mensual de subproductos: hojuelas de (PP/PEAD/PEBD) reciclado.  
Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar los resultados del balance de materia, se requieren 168 670 kg de envases PET post-consumo para conseguir 149 781 kg de hojuelas de PET reciclado; es decir, se presentan los siguientes indicadores:

- 1 126 kg de envases PET post-consumo/TM de PET reciclado.
- 22 772 kg de envases PET post-consumo/TM de PP reciclado.
- 57 361 kg de envases PET post-consumo/TM de PEBD reciclado.
- La cantidad de pérdida de material (sedimento, impurezas y polvo de PET) generada en el reciclaje de envases PET post-consumo es 4.1%.

## **- Balance de Energía**

### **a) Balance de Energía Eléctrica**

Actualmente, en la empresa se realiza un programa de mantenimiento preventivo-correctivo de las máquinas y equipos para su aprovechamiento eficiente, de tal manera se tomaron las lecturas promedio de intensidad de corriente (amperios) de los tableros de control eléctrico; teniendo en cuenta que cada máquina cuenta con un sistema trifásico, se determina la potencia activa útil real (potencia que la carga absorbe de la red y la transforma en trabajo útil), para cada operación unitaria necesaria en la planta de reciclaje de envases PET post-consumo. Se emplea lo siguiente:

$$P_{real}(kW) = \frac{I(A).V(V).(\sqrt{3}).fp}{1000}$$

Donde:

$P_{real}(kW)$  = Potencia real en kilowatts

$I(A)$  = Intensidad de corriente en amperios

$V(v)$  = Voltaje en voltios: 220

$fp$  = Factor de potencia: 0.8

En la Tabla 4.8 se muestra el consumo de energía por operaciones unitarias del proceso de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo (PET cristal), luego en la Tabla 4.9 se muestran los resultados del balance de energía del proceso de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.

**Tabla 4.8: Consumo de energía por operaciones unitarias del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo (PET cristal)**

<b>Operaciones Unitarias</b>	<b>I (A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>fp</b>	<b>P<sub>real</sub>(kW) = <math>\frac{I(A) \cdot V(V) \cdot (\sqrt{3}) \cdot fp}{1000}</math></b>	<b>E(kWh) = P<sub>real</sub>(kW) · (21x8h)</b>	<b>P<sub>nominal</sub> (kW)</b>
Selección primaria	3.7	220	0.8	1.13	190	1.50
Separación Trommel	5.6	220	0.8	1.71	287	2.25
Selección secundaria	3.7	220	0.8	1.13	190	1.50
Molienda	144.9	220	0.8	44.16	7 419	51.00
Prelavado	13.0	220	0.8	3.97	667	5.25
Flotación	31.0	220	0.8	9.47	1 591	12.75
Centrifugado de prelavado	21.7	220	0.8	6.63	1 114	9.00
Lavado en caliente	38.9	220	0.8	11.87	1 994	15.75
Lavado por fricción	15.0	220	0.8	4.57	768	7.50
Centrifugado de enjuague	21.7	220	0.8	6.63	1 114	9.00
Enjuague	26.0	220	0.8	7.94	1 334	10.50
Centrifugado de secado	18.0	220	0.8	5.49	922	7.50
Escogido manual	3.7	220	0.8	1.13	190	1.50
Remolienda	69.8	220	0.8	21.28	3 575	29.25
Envasado	-	-	-	-	-	-
<b>Total Energía Eléctrica (kWh)</b>	-	-	-	-	<b>21 355</b>	-
<b>Energía Térmica equivalente de 4200 kg carbón mineral (antracita)* en (kWh)</b>	-	-	-	-	<b>23 446</b>	-
<b>Total de Energía utilizada: Eléctrica + Térmica en (kWh)</b>	-	-	-	-	<b>44 801</b>	-

\* Poder calorífico del carbón mineral (antracita): 6 000 kcal/kg, contenido de 80% de carbón.

\*\* 1 kWh es equivalente a 859.85 kcal.

\*\*\* El número de días en que se lavan las hojuelas de PET cristal es 21, luego se continúa con el lavado de hojuelas de PET por color y hojuelas de PET aceite.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.9: Resultados del balance de energía del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

Operaciones Unitarias	Energía utilizada en el reciclaje de envases PET post-consumo (kWh)					
	Envase PET cristal	Envase PET celeste	Envase PET azul	Envase PET verde	Envase PET marrón y otros	Envase PET (aceite)
Selección primaria	190	4.5	3.4	10.2	2.3	15.8
Separación Trommel	287	6.8	5.1	15.3	3.4	23.9
Selección secundaria	190	4.5	3.4	10.2	2.3	15.8
Molienda	7 419	176.6	132.4	396.6	88.3	618.0
Prelavado	667	15.9	11.9	35.7	7.9	55.6
Flotación	1 591	37.9	28.4	85.1	18.9	132.6
Centrifugado de prelavado	1 114	26.5	19.9	59.6	13.3	92.8
Lavado en caliente	1 994	47.5	35.6	106.7	23.7	166.2
Lavado por fricción	768	18.3	13.7	41.1	9.1	64.0
Centrifugado de enjuague	1 114	26.5	19.9	59.6	13.3	92.8
Enjuague	1 334	31.8	23.8	71.3	15.9	111.2
Centrifugado de secado	922	22.0	16.5	49.3	11.0	76.8
Escogido manual	190	4.5	3.4	10.2	2.3	15.8
Remolienda	3 575	85.1	63.8	191.1	42.5	297.9
Envasado	-	-	-	-	-	-
<b>Total de Energía Eléctrica (kWh)</b>	<b>21 355</b>	<b>508</b>	<b>381</b>	<b>1 142</b>	<b>254</b>	<b>1 779</b>
Cantidad de carbón mineral (antracita)* utilizada en el Lavado en caliente (kg)	4 200	100	75	224	51	351
<b>Energía Térmica equivalente de carbón mineral (antracita) en (kWh)</b>	<b>23 446</b>	<b>558</b>	<b>419</b>	<b>1 250</b>	<b>285</b>	<b>1 959</b>
<b>Total de Energía Utilizada: Eléctrica + Térmica en (kWh)</b>	<b>44 801</b>	<b>1066</b>	<b>800</b>	<b>2 392</b>	<b>539</b>	<b>3 738</b>

\* Poder calorífico del carbón mineral (antracita): 6 000 kcal/kg, contenido de 80% de carbón.

\*\* 1 kWh es equivalente a 859.85 kcal.

\*\*\* El número de días en que se lava el PET cristal es 21, luego se continúa con el lavado de PET por color y PET aceite.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.10: Resultados del balance de energía del Proceso de Lavado de hojuelas de PET reciclado**

Operaciones Unitarias	Energía utilizada en el lavado de hojuelas de PET reciclado (kWh)					
	Hojuela PET cristal	Hojuela PET celeste	Hojuela PET azul	Hojuela PET verde	Hojuela PET marrón y otros	Hojuela PET (aceite)
Prelavado	667	15.9	11.9	35.7	7.9	55.6
Flotación	1 591	37.9	28.4	85.1	18.9	132.6
Centrifugado de prelavado	1 114	26.5	19.9	59.6	13.3	92.8
Lavado en caliente	1 994	47.5	35.6	106.7	23.7	166.2
Lavado por fricción	768	18.3	13.7	41.1	9.1	64.0
Centrifugado de enjuague	1 114	26.5	19.9	59.6	13.3	92.8
Enjuague	1 334	31.8	23.8	71.3	15.9	111.2
Centrifugado de secado	922	22.0	16.5	49.3	11.0	76.8
Escogido manual	190	4.5	3.4	10.2	2.3	15.8
Remolienda	3 575	85.1	63.8	191.1	42.5	297.9
Envasado	-	-	-	-	-	-
<b>Total de Energía Eléctrica (kWh)</b>	<b>12 982</b>	<b>309</b>	<b>232</b>	<b>694</b>	<b>155</b>	<b>1 082</b>
Cantidad de carbón mineral (antracita)* utilizada en el Lavado en caliente (kg)	4 200	100	75	224	51	351
<b>Energía Térmica equivalente de carbón mineral (antracita) en (kWh)**</b>	<b>23 446</b>	<b>558</b>	<b>419</b>	<b>1 250</b>	<b>285</b>	<b>1 959</b>
<b>Total de Energía Utilizada: Eléctrica + Térmica en (kWh)</b>	<b>36 428</b>	<b>867</b>	<b>651</b>	<b>1 944</b>	<b>440</b>	<b>3 041</b>

\* Poder calorífico del carbón mineral (antracita): 6 000 kcal/kg, contenido de 80% de carbón.

\*\* 1 kWh es equivalente a 859.85 kcal.

Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar los resultados del balance de energía, incluyendo el total de energía eléctrica y térmica, se obtienen los siguientes indicadores:

- 357 kWh/TM de PET reciclado; a partir de envases PET post-consumo.
- 290 kWh/TM de PET reciclado; a partir de la compra de PET molido en hojuelas.

Si se consideran la cantidad de energía utilizada por separado:

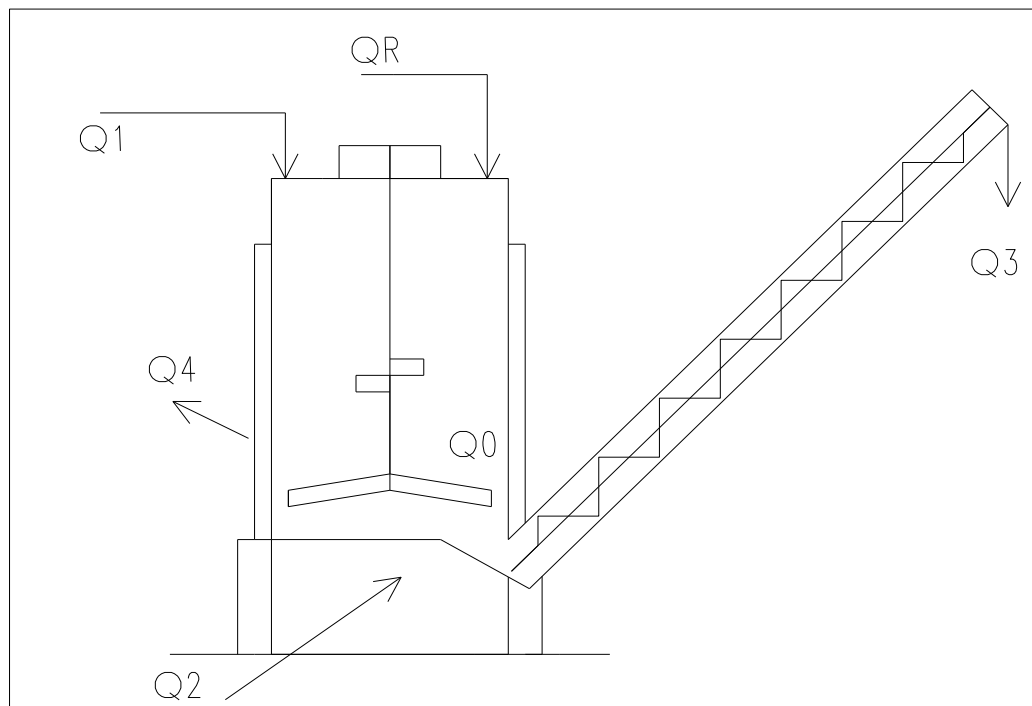
- 136.2 kWh/TM de PET reciclado, de energía eléctrica, y
- 186.1 kWh/TM de PET reciclado, de energía térmica; en promedio.

### **b) Balance de Energía Térmica de la operación de Lavado en Caliente de hojuelas de PET reciclado**

La operación de Lavado en Caliente de las hojuelas de PET reciclado se mantiene a una temperatura de 92°C, para tal efecto, el tanque de lavado es calentado de manera permanente por el calor que genera la combustión del carbón mineral (antracita), las cuales combustionan en un recinto acoplado en la base del tanque, de tal manera que la transferencia de calor hacia el tanque se realiza sólo por la base de éste; el tanque de lavado en caliente se encuentra enchaquetado con fibra de vidrio de 10 cm de espesor. En la Figura 4.26 se muestra el esquema que describe la operación de lavado en caliente.

Consideraciones:

- No ocurre reacción química que produzca absorción o generación de energía; por lo que la suma de energía térmica de entrada es igual a la suma de energía térmica de salida.
- Se considera despreciable el trabajo entregado.



**Figura 4.26: Esquema de la operación de Lavado en Caliente de hojuelas de PET reciclado**

Fuente: Elaboración propia



Se realiza el balance de energía con el objetivo de conocer la energía térmica perdida en el sistema, con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{\text{entregado}} = Q_{\text{absorbido}} + Q_{\text{perdido}} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

$$Q_{\text{entregado}} = Q_2 \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_0 + Q_3 - Q_1 - Q_R \dots \dots \dots (3)$$

Siendo:

$Q_0$  = Calor requerido inicialmente para calentar la solución del tanque de lavado, en kJ/turno.

$Q_1$  = Energía con la que ingresa el material (PET húmedo) al tanque de lavado, en kJ/turno.

$Q_2$  = Calor entregado por el carbón mineral (antracita) utilizado, en kJ/turno.

$Q_3$  = Energía con la que sale el material (PET húmedo) lavado en caliente, en kJ/turno.

$Q_4$  = Calor perdido ( $Q_{\text{perdido}}$ ) por la combustión parcial del carbón mineral (antracita), pérdidas a través de las paredes del tanque de lavado inicialmente para calentar la solución del tanque de lavado, temperaturas altas de salida de los gases de combustión, en kJ/turno.

$Q_R$  = Calor que se aprovecha al recircular la solución de lavado desde la centrifugadora de enjuague hasta el tanque de lavado en caliente, en kJ/turno.

Reemplazando las ecuaciones: (2) y (3) en (1), se puede calcular el calor perdido ( $Q_4$ ) del sistema, según:

$$Q_4 = Q_2 - (Q_0 + Q_3 - Q_1 - Q_R) \dots \dots \dots (4)$$

Además:

$$Q_0 = m_{(\text{H}_2\text{O-tanque})} \times C_{p(\text{H}_2\text{O})} \times (T_0 - T_{\text{ref}}) \dots \dots \dots (5)$$

$$Q_1 = m_{(\text{H}_2\text{O-1})} \times C_{p(\text{H}_2\text{O})} \times (T_1 - T_{\text{ref}}) + m_{(\text{PET-1})} \times C_{p(\text{PET})} \times (T_1 - T_{\text{ref}}) \dots \dots \dots (6)$$

$$Q_2 = m_{(\text{carbón-antracita})} \times \%C_{\text{carbón}} \times P_{c(\text{carbón-antracita})} \dots \dots \dots (7)$$

$$Q_3 = m_{(H_2O-3)} \times Cp_{(H_2O)} \times (T_3 - T_{ref}) + m_{(PET-3)} \times Cp_{(PET)} \times (T_3 - T_{ref}) \dots\dots\dots(8)$$

$$Q_R = m_{(H_2O-R)} \times Cp_{(H_2O)} \times (T_R - T_{ref}) \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

$m_{(H_2O-tanque)}$  = Masa de agua inicial en el tanque de lavado; 2000 kg/turno.

$m_{(H_2O-1)}$  = Masa de agua que ingresa al tanque de lavado con el PET húmedo; 253 kg/turno.

$m_{(H_2O-3)}$  = Masa de agua que sale del tanque de lavado con el PET húmedo; 987 kg/turno.

$m_{(H_2O-R)}$  = Masa de agua que ingresa con la recirculación al tanque de lavado en caliente; 734 kg/turno.

$m_{(PET-1)}$  = Masa de PET que ingresa al tanque de lavado; 6063 kg/turno.

$m_{(PET-3)}$  = Masa de PET que sale del tanque de lavado; 6063 kg/turno.

$T_0, T_1, T_3$  y  $T_R$  = Temperatura de los Flujos: 0, 1, 3 y R; respectivamente: 92, 25, 92 y 30°C.

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia para los cálculos: 20°C.

$Cp_{(H_2O)}$  = Capacidad calorífica del agua; 4.184 kJ/kg.°C.

$Cp_{(PET)}$  = Capacidad calorífica del PET; 1.275 kJ/kg.°C.

$M_{(carbón-antracita)}$  = Masa de carbón mineral (antracita) utilizado; 200 kg/turno.

$\%C_{carbón}$  = Porcentaje de carbón fijo que contiene el carbón mineral (antracita); 80%. [38].

$PC_{(carbón-antracita)}$  = Poder calorífico inferior del carbón mineral (antracita); 6000 kcal/kg, equivalente a: 25104 kJ/kg. [38]

Reemplazando los datos de las ecuaciones: (5), (6), (7), (8) y (9) en (4); se obtiene que el calor perdido del sistema ( $Q_4$ ) es 2 634 884 kJ/turno.

Además, se podrá calcular el rendimiento energético ( $\eta$ ) del sistema de calentamiento del tanque de lavado, según la ecuación:

$$\eta = (Q_{absorbido}/Q_{entregado}) \times 100 \% \dots\dots\dots (10)$$

Luego, reemplazando los datos de la ecuación (2) y (3) en (10) se obtiene que el rendimiento energético ( $\eta$ ) del sistema de calentamiento es 34.4%.

**Tabla 4.11: Resultados del balance de energía del Proceso de Lavado de hojuelas PP/PEBD provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado**

Operaciones Unitarias	Energía utilizada en el lavado de hojuelas de PP/PEBD reciclado (kWh)			
	PP/PEBD a partir de PET cristal y colores		PEAD/PEBD a partir de PET de aceite	
	Hojuelas PP (tapitas)	Hojuelas PEBD (etiquetas)	Hojuelas PEAD (tapitas)	Hojuelas PEBD (etiquetas)
<b>Hojuelas de PP/PEBD reciclado* (kg)</b>	<b>14 841</b>	<b>5 503</b>	<b>949</b>	<b>368</b>
Lavado por fricción	296.0		18.9	
Flotación	122.8		7.8	
Enjuague	48.3		3.1	
Centrifugado de secado	323.5		20.7	
Secado	222.9		14.2	
Remolienda	453.9		29.0	
Separación de etiquetas	112.8		7.2	
Envasado	-		-	
<b>Total de Energía Eléctrica (kWh)</b>	<b>1 580.2</b>		<b>101.0</b>	
Cantidad de Gas Licuado de Petróleo (GLP)** utilizada en el secado en caliente (kg)	92.0		5.6	
<b>Energía Térmica equivalente de Gas Licuado de Petróleo (GLP) (kWh)***</b>	<b>1 262.6</b>		<b>76.9</b>	
<b>Total de Energía Utilizada: Eléctrica + Térmica en (kWh)</b>	<b>2 843</b>		<b>178</b>	

\* Cantidad de producción mensual de subproductos: hojuelas de PP/PEAD/PEBD reciclado.

\*\* Poder calorífico del Gas Licuado de Petróleo (GLP): 11 800 kcal/kg.

\*\*\* 1 kWh es equivalente a 859.85 kcal.

Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar los resultados del balance de energía para la Línea de Lavado de hojuelas PP/PEBD; la cual trabaja los últimos 6 días de cada mes en un solo turno de 7:00 a 15:00 horas, se obtiene el siguiente indicador:

- 192 kWh/(1 TM de PP reciclado + 371 kg de PEBD reciclado)

#### 4.2.5 Identificación de las causas de los flujos de contaminantes y de las ineficiencias

Se considera a la Línea de Lavado de hojuelas PP/PEBD reciclado como un proceso productivo eficiente debido a la cantidad de días trabajados, y nos enfocaremos en la *Línea de Molienda de envases PET post-consumo* y la *Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado*.

##### a) Generación de sedimento, aguas residuales y emisiones

Se cuenta con los siguientes datos de la generación de sedimento en el proceso de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo:

**Tabla 4.12: Generación de sedimento en el Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

Operaciones Unitarias	Sedimento* (kg/mes)
Selección primaria	-
Separación Trommel	83
Selección secundaria	-
Molienda	-
Prelavado	2 614
Flotación	1 391
Centrifugado de prelavado	1 212
Lavado en caliente	2 013
Lavado por fricción	498
Centrifugado de enjuague	2 252
Enjuague	497
Centrifugado de secado	1 057
Escogido manual	67
Remolienda	361
Envasado	-
<b>Total</b>	<b>12 045</b>

\* Se considera en base seca para los cálculos correspondientes.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis de caracterización del sedimento (plástico refinado, arenilla y suciedad) mostrado en el Anexo D; este tipo de residuo se dispone en un relleno sanitario, por parte de una Empresa Prestadora de

Servicios de Residuos Sólidos (EPS-RS). Se presenta el siguiente indicador: 40.15 kg de sedimento/TM de PET reciclado.

Se cuenta con los siguientes datos de la generación de aguas residuales en el proceso de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo:

**Tabla 4.13: Generación de aguas residuales del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

<b>Operaciones Unitarias</b>	<b>Agua fresca de ingreso (m<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>Aguas residuales de salida (m<sup>3</sup>/mes)</b>
Selección primaria	-	-
Separación Trommel	-	-
Selección secundaria	-	-
Molienda	-	-
Prelavado	57.70	19.76
Flotación	312.00	302.66
Centrifugado de prelavado	-	34.12
Lavado en caliente	73.05	39.29
Lavado por fricción	-	-
Centrifugado de enjuague	-	33.90
Enjuague	260.00	226.67
Centrifugado de secado	-	33.47
Escogido manual	-	-
Remolienda*	-	9.76
Envasado	-	-
Cantidad de agua como humedad** (1.0 %) en el producto terminado	-	3.12
<b>Total</b>	<b>702.75</b>	<b>689.87</b>

\* Cantidad de agua que se evapora en la operación unitaria de remolienda.

\*\* Cantidad de agua como humedad que se incluye en el producto terminado.

Fuente: Elaboración propia

De los datos mostrados en la Tabla 4.13 se obtiene el siguiente indicador respecto al consumo de agua fresca y a la generación de aguas residuales en la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado:

- 2.35 m<sup>3</sup> de agua fresca/TM de PET reciclado.
- 2.30 m<sup>3</sup> de aguas residuales/TM de PET reciclado.

Se cuenta con los siguientes datos de la generación de cenizas y emisiones en la operación de lavado en caliente, para el proceso de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo:

**Tabla 4.14: Generación de cenizas y emisiones en el Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo**

<b>Operación Unitaria</b>	<b>Cenizas* (kg/mes)</b>	<b>Emisiones (kg/mes)</b>
Lavado en caliente	2 080	8 320

\* Los costales vacíos que han contenido el carbón mineral (antracita) se usan para almacenar las cenizas para su posterior disposición final.

Fuente: Elaboración propia

De los datos mostrados en la Tabla 4.14 se obtiene el siguiente indicador:

- 6.93 kg de cenizas/TM de PET reciclado.

#### **b) Flujo de contaminantes y sus causas**

1. Sedimento (residuo sólido) en las operaciones de centrifugado: de pre-lavado, de enjuague y de secado.

Este flujo representa 4 521 kg/mes y está compuesto por 85% aproximadamente de PET refinado, el costo de este flujo equivale a S/ 5 877.00/mes. La pérdida de este material representa el 37.5% de la pérdida total de material como sedimento.

Causas:

Se identifica al diseño de las centrifugadoras, las cuales cuentan con un tamiz con orificios de 2 mm, como la causante de pérdida de material refinado de PET. El tamiz permite pasar el agua, arenilla y refinado de PET de diámetro menor o igual a 2 mm.

2. Aguas residuales del proceso de lavado de hojuelas de envases PET post-consumo.

Este efluente pasa por el Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales, para reducir la carga contaminante; sin embargo, el parámetro de pH: 11 en promedio, excede al Valor Máximo Admisible (VMA) para descarga en el alcantarillado sanitario.

Causas:

Este efluente es alcalino debido a que contiene soda cáustica disuelta, la cual es usada en la operación de lavado en caliente.

Se cuenta con los siguientes datos para los efluentes que son tratados con el Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales provenientes de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado y son descargadas en el sistema de alcantarillado sanitario.

**Tabla 4.15: Valores Máximos Admisibles (VMA) para efluente después de tratamiento primario descargado al alcantarillado sanitario**

Parámetros	Unidad	Expresión	VMA	VMA
			Compañía Ecológica GW SAC	SEDAPAL
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l	DBO <sub>5</sub>	283	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	DQO	517	1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	SST	125	500
Aceites y grasas (A y G)	mg/l	A y G	14	100
pH	unidad	pH	11.0	6.0 - 9.0
Temperatura	°C	T	23	menor a 35

Fuente: Análisis de Agua Residual Tratada descargada al alcantarillado sanitario (Línea completa), NSF Envirolab SAC, junio 2018.

Este efluente es generado luego de 2 turnos seguidos de lavado, y como se puede observar, el parámetro de pH sobrepasa el VMA indicado por el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). Los sedimentos obtenidos en las operaciones de prelavado, centrifugado de prelavado, enjuague y secado; compuestos principalmente por plástico PET refinado y arenillas producto de la suciedad, son retiradas durante el proceso de lavado, evitando que lleguen al canal del Sistema de Tratamiento Primario de aguas residuales, para minimizar la cantidad de lodos durante la sedimentación.

3. Cenizas y emisiones del horno en la operación de lavado en caliente.

Los flujos de contaminantes, son el flujo de cenizas: 2 080 kg/mes y las emisiones con contenido de ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) son: 8 320 kg/mes, las cuales no pudo determinarse su composición porque el horno no cuenta con una chimenea instalada.

Causas:

La cantidad de cenizas y emisiones se generan por la combustión de carbón mineral (antracita) en el horno instalado en la base de la lavadora en caliente. Las cenizas generadas son acumuladas y almacenadas en sus sacos respectivos se disponen en un relleno de seguridad por considerarse residuo peligroso, por parte de una Empresa Prestadora de Servicios de Residuos Sólidos (EPS-RS).

4. Sacos vacíos de soda cáustica y detergente

La cantidad generada de sacos vacíos de soda cáustica y detergente es: 32.2 kg/mes.

Causas:

Los sacos vacíos son generados por los insumos químicos utilizados en la operación de lavado en caliente; los cuales son soda cáustica y detergente en polvo. Este tipo de residuo se considera residuo



peligroso y se dispone en un relleno de seguridad, por parte de una Empresa Prestadora de Servicios de Residuos Sólidos (EPS-RS).

### **c) Ineficiencias y sus causas**

#### **1. Operación de calentamiento con carbón mineral (antracita)**

La operación de calentamiento resulta ser una operación ineficiente, pues según el resultado del balance de energía térmica, se tiene un rendimiento energético de 34.4%; es decir, más del 50% de la energía suministrada por el carbón mineral (antracita) se pierde; por lo tanto, es necesaria la aplicación de alguna oportunidad de Producción Más Limpia.

Causas:

La operación de calentamiento es ineficiente porque el calor es suministrado sólo a través del 60% de la superficie disponible de transferencia; además el enchaquetado con fibra de vidrio de la lavadora en caliente es de 10 cm de espesor, la cual debe reforzarse a 20 cm de espesor y enchaquetar el ducto del transportador sinfín de salida de hojuelas de PET lavadas.

Además, se tiene que considerar que la alimentación de carbón mineral se realiza de manera manual, la cual involucra la apertura de la puerta del horno a períodos de una hora para la respectiva remoción de cenizas y carga de carbón mineral (antracita).

#### **4.2.6 Oportunidades de Producción Más Limpia**

Las oportunidades de Producción Más Limpia generadas están vinculadas a los aspectos de la sustitución de insumos, reutilización de recursos in situ, y cambios y modificaciones en la tecnología; seguidamente se describen múltiples oportunidades de Producción Más Limpia que atacarán directamente a las causas de los flujos de contaminantes y las ineficiencias; éstas son:

#### A. Sustitución de insumos

- Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E), que está a base de Lauril éter sulfato de sodio (LESS) al 70% y componentes biodegradables, que mejorará la calidad del producto terminado y del efluente generado.
- Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), que permitirá el aprovechamiento más eficiente del combustible y generará menos emisiones y residuos sólidos.

#### B. Reutilización, recuperación y reciclaje in situ

- Reutilización de las aguas de enjuague al final del proceso en las tinas de flotación del siguiente turno, teniendo en cuenta que el cambio de aguas se realiza al final de dos turnos seguidos, que permitirá el ahorro de agua en el proceso de lavado de hojuelas de envases PET post-consumo.

#### C. Cambios y modificaciones en la tecnología

- Instalación de un horno por resistencias eléctricas en el tanque de lavado en caliente.
- Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios, que permitirá reducir la cantidad de sedimento (PET refinado) que se pierde.
- Reducción de pH del efluente global después del tratamiento primario de aguas residuales. *(Nota: Esta oportunidad de Producción Más Limpia se considera simple y práctica; será implementada a la brevedad posible, ya que permitirá a la empresa, su adecuación a la legislación ambiental vigente respecto a los VMA para efluente descargado al alcantarillado sanitario).*

#### **4.2.7 Pre-selección de las oportunidades de Producción Más Limpia**

En la pre-selección de las oportunidades de Producción Más Limpia se aplicará el Método de la suma ponderada, el cual consiste en un método cuantitativo para clasificar y priorizar las opciones de prevención de la contaminación ambiental que afectan el manejo de residuos, efluentes y emisiones en la empresa.

Este método comprende cuatro pasos:

1. Los criterios importantes se identifican en términos de las metas y limitaciones del programa de PML. Se consideran los siguientes criterios:
  - Reducción de residuos, efluentes y emisiones.
  - Reducción de costo de tratamiento de residuos.
  - Reducción del riesgo para la seguridad del personal.
  - Costo de inversión.
  - Corto período de implementación.
  - Ahorro económico generado.
- “Se aplica una ponderación de escala de 0 (mínima importancia) a 10 (máxima importancia) para cada criterio”.
2. “Luego cada oportunidad es evaluada, según cada criterio. Nuevamente se aplica una escala de 0 (bajo) a 10 (alto)”.
3. “Además, el puntaje de cada oportunidad para cada criterio se multiplica por el peso respectivo. El puntaje total de la oportunidad de PML es la suma de los productos del puntaje por el peso de cada criterio”.
4. “Se seleccionan a las oportunidades de PML con los mejores puntajes para aplicarles un análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental”.

En la Tabla 4.16 se muestra la aplicación del Método de la suma ponderada para la pre-selección de las oportunidades de PML.

**Tabla 4.16: Pre-selección de las oportunidades de Producción Más Limpia por el método de la suma ponderada**

N°	Oportunidades de Producción Más Limpia	Criterios para cada oportunidad de PML						Total de suma ponderada
		Reducción de residuos, efluentes y emisiones	Reducción de costo de tratamiento de residuos	Reducción del riesgo para la seguridad del personal	Costo de inversión	Corto período de implementación	Ahorro económico generado	
Peso		10	8	7	6	5	5	
1	Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E).	4	4	6	8	10	8	252
2	Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP) y cambio de tecnología.	10	10	8	6	8	6	342
3	Instalación de un horno por resistencias eléctricas en el tanque de lavado en caliente.	6	6	4	2	4	0	168
4	Reutilización de las aguas de enjuague al final del proceso en las tinas de flotación del siguiente turno.	8	8	8	8	8	6	318
5	Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios.	8	8	6	8	8	6	304

Fuente: Elaboración propia

La pre-selección de oportunidades de PML para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, mediante el Método de la suma ponderada, muestra que hay 1 oportunidad con el puntaje más bajo, siendo ésta descartada, quedando finalmente 4 oportunidades de Producción Más Limpia para su posterior estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental.

### **4.3 TERCERA ETAPA: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD**

Se realizará el estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental de las oportunidades de Producción Más Limpia (PML) para determinar la viabilidad de cada una.

#### **4.3.1 Evaluación Técnica**

Según la “*Guía Peruana GP 900.200:2007*, sostiene: en esta evaluación se considera el impacto que tendrán las oportunidades de PML en las tasas de producción, tiempos de operación, adición o eliminación de operación unitaria o actividad, capacitación adicional y/o cambio de personal”.

Las actividades a desarrollarse son:

- “Detallar los cambios técnicos necesarios para implementar cada oportunidad de Producción Más Limpia; es decir, describir el diseño de los cambios propuestos, especificar la naturaleza, forma y cantidad de entradas y salidas de la operación, definir las nuevas condiciones operativas propuestas y sus posibles efectos e interrelaciones con el resto de las operaciones unitarias que componen el proceso productivo”.
- “Detallar la disponibilidad o acceso a tecnología, materias primas e insumos, espacio físico, logística, servicios, etc”.
- “Proyectar el impacto de cada oportunidad de PML sobre los consumos de materiales y energía, y generación de contaminantes”.

**Oportunidad N°1:** Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E).

**Tabla 4.17: Evaluación Técnica de Oportunidad N°1 de PML**

Requerimientos Técnicos		
Detalles Técnicos	Disponibilidad	Observación
Existencia del insumo a nivel comercial.	Sí	Mejora la calidad del producto terminado.
Personal adicional para la dosificación en el tanque de lavado.	No	Lo realizará el mismo personal que alimentaba el detergente en polvo.
Interferencia con otras operaciones unitarias	No	-
Lugar de almacenamiento	Sí	En el mismo almacén.
Flujo de contaminantes proyectados por mes		
Efluentes/Residuos	Mejora	
Aguas Residuales	Se mantiene la cantidad generada de efluente, pero se mejora su característica contaminante para un posterior tratamiento.	
Envases vacíos	Se reducirá la generación de sacos vacíos de detergente en polvo, y se podrá utilizar los cilindros de plástico del detergente líquido biodegradable de 350 litros de capacidad, para almacenar la chatarra, por ejemplo, del Área de Mantenimiento.	
Consumo de energía eléctrica por mes		
Actividad	Antes	Propuesto
Almacenamiento	-	-

Fuente: Elaboración propia

A partir de la evaluación realizada, se concluye que la Oportunidad N°1 de PML es técnicamente viable.

**Oportunidad N°2:** Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), y cambio de tecnología

**Tabla 4.18: Evaluación Técnica de Oportunidad N°2 de PML**

Requerimientos Técnicos			
Detalles Técnicos		Disponibilidad	Observación
Existencia del sistema de almacenamiento y combustión de GLP.		Sí	Accesible en el mercado del sector energético.
Área requerida para la instalación: (6mx3m)		Sí	Se acondicionará un espacio adecuado tomando las medidas de seguridad.
Interferencia con otras operaciones unitarias		No	Se reducirá la carga laboral del personal que alimentaba carbón mineral (antracita).
Consumo de Energía Eléctrica.		No	-
Flujo de contaminantes proyectados por mes			
Residuos, emisiones	Antes	Propuesto	% Mejora
Cenizas	2 080 kg	0	100%
Gases de combustión (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> )	8 320 kg	-	Se cuantificará con los análisis que se realizarán a los gases de chimenea.
Consumo de energía eléctrica por mes			
Actividad	Antes	Propuesto	
Calentamiento del tanque de lavado de hojuelas de PET reciclado (soplador turbo para combustión).	445 kWh	0 kWh	

Fuente: Elaboración propia

A partir de la evaluación realizada, se concluye que la Oportunidad N°2 de PML es técnicamente viable.

**Oportunidad N°3:** Reutilización de las aguas de enjuague de final del proceso en las tinas de flotación del siguiente turno.

**Tabla 4.19: Evaluación Técnica de Oportunidad N°3 de PML**

Requerimientos Técnicos			
Detalles Técnicos		Disponibilidad	Observación
La construcción se realizará en concreto armado.		Sí	-
Área requerida para la instalación (6mx1.5mx1.2m)		Sí	Se realizará una excavación cercana a las 2 tinas de enjuague.
Interferencia con otras operaciones unitarias		No	-
Consumo de Energía Eléctrica.		Sí	Se instalará una bomba adicional de 1.5 kW.
Flujo de contaminantes proyectados por mes			
Efluente	Antes	Propuesto	% Reducción
Aguas Residuales	690 m3	440 m3	36.5 %
Consumo de energía eléctrica por mes			
Actividad	Antes	Propuesto	
Reutilización de las aguas de enjuague.	27.3 kWh	27.3 kWh Nota: Es el mismo gasto que se realizaría al bombear agua fresca a las 2 tinas de flotación.	

\*Nota: De acuerdo al análisis de aguas residuales mostradas en el Anexo C, se tiene que el efluente descargado al alcantarillado sin incluir las tinas de enjuague, no supera los VMA, salvo en el valor de pH: 12.5, que se tiene que reducir.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la evaluación realizada, se concluye que la Oportunidad N°3 de PML es técnicamente viable.



**Oportunidad N°4:** Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios.

**Tabla 4.20: Evaluación Técnica de Oportunidad N°4 de PML**

Requerimientos Técnicos			
Detalles Técnicos		Disponibilidad	Observación
Existencia del tamiz para instalar en las 3 centrifugadoras.		Sí	-
Área requerida para la instalación.		No	Se realizará el cambio del tamiz en la misma máquina sin modificar su estructura.
Interferencia con otras operaciones unitarias		No	-
Consumo de Energía Eléctrica.		No	-
Flujo de contaminantes proyectados por mes			
Residuo	Antes	Propuesto	% Reducción
Sedimento (PET refinado, arenilla y suciedad)	4 521 kg	3843 kg	15% respecto de la cantidad en el centrifugado.  5.9% respecto del proceso completo.
Consumo de energía eléctrica por mes			
Operaciones Unitarias	Antes	Propuesto	
Centrifugado de pre-lavado, de enjuague, de secado.	7 500 kWh	7 500 kWh  Se mantiene el consumo de energía eléctrica.	

Fuente: Elaboración propia

A partir de la evaluación realizada, se concluye que la Oportunidad N°4 de PML es técnicamente viable.

### 4.3.2 Evaluación Económica

La evaluación económica tiene por “finalidad determinar si las oportunidades de PML a implantar son rentables para la organización. Es vital realizar un análisis adecuado de este tipo, de lo contrario la oportunidad de PML puede dar lugar a un fracaso económico del proyecto”.

“Varios tipos de conceptos financieros pueden ser aplicados para evaluar la factibilidad económica de una oportunidad de Producción Más Limpia: Los conceptos de período de recuperación de la inversión y rentabilidad de la inversión son utilizados para realizar evaluaciones económicas rápidas y sencillas, y se usan frecuentemente en la evaluación económica de las oportunidades de Producción Más Limpia”.

**Oportunidad N°1:** Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E).

<b>Tabla 4.21: Evaluación Económica de Oportunidad N°1 de PML</b>	
<b>Inversión (S/)</b>	
1) Costo de 1126 kg x S/ 3.80 kg de detergente Texapon-E....S/	4 278.80
2) Requerimiento adicional respecto a su empleo.....	–
<b>Total de Inversión (Incluido IGV)</b>	<b>S/ 4 278.80</b>
<b>Ahorro mensual (S/)</b>	
1) Costo de 1126 kg x S/ 4.20 kg de detergente en polvo.....S/	4 729.20
2) Reducción de costo por utilizar detergente Texapon-E.....S/	450.40
<b>Total de Ahorro (Incluido IGV)</b>	<b>S/ 450.40</b>
<b>Período de Recuperación de la Inversión (PRI)</b>	
En este caso la recuperación es inmediata, al primer mes de sustituir el detergente en polvo por el detergente líquido biodegradable Texapon-E, es decir; genera ahorros de S/ 450.00 (Soles) mensuales.	

Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis realizado, se concluye que la Oportunidad N°1 de PML es económicamente viable.

**Oportunidad N°2:** Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), y cambio de tecnología.

**Tabla 4.22: Evaluación Económica de Oportunidad N°2 de PML**

<b>Inversión (S/)</b>	
1) Tanque homologado horizontal de plancha de acero, para almacenamiento de GLP, con capacidad de 1892 litros .....	USD 1 115.00* (S/ 3 702.00)
2) Vaporizador para convertir GLP líquido a GLP vapor.....	USD 660.00* (S/ 2 191.00)
3) Tuberías y accesorios de cobre, medidores.....	S/ 1 800.00
4) 3 hornillas industriales de fierro fundido .....	S/ 600.00
5) Instalación (mano de obra).....	S/ 800.00
6) Reforzamiento de enchaquetado a 20 cm con fibra de vidrio en el tanque de lavado en caliente.....	S/ 800.00
7) Diseño, construcción e instalación de chimenea.....	S/ 2 200.00
8) IGV (18 %). .....	S/ 2 655.00
<b>Total de Inversión</b>	<b>S/ 14 748.00</b>
<b>Ahorro mensual (S/)</b>	
1) Reducción por disposición final de cenizas de carbón mineral (antracita) 2 080 kg de cenizas x S/ 200/1000 kg de cenizas.....	S/ 416.00
2) Reducción por consumo de energía eléctrica del soplador turbo 445 kWh x (S/ 0.2293/kWh).....	S/ 102.00 (Enel Distribución Perú SAA – Tarifa BT3)
3) Reducción por consumo de combustible.....	S/ 787.00
Energía térmica suministrada: 10 400 kg x 0.8 x 6000 kcal/kg x (34.4%) = 1 402.6 galones de GLP x 24 486 kcal/gal GLP x (50.0%)	
Costo: 10 400 kg x S/ 0.75/ kg de antracita: S/ 7 800.00	
Costo: 1402.6 galones de GLP x S/ 5.00/gal GLP: S/ 7 013.00	
4) IGV (18 %). .....	S/ 287.00
<b>Total de Ahorro</b>	<b>S/ 1 592.00</b>
<b>Período de Recuperación de la Inversión (PRI)</b>	
PRI = (Inversión)/(Ahorro mensual)	
PRI = (S/ 14 748.00)/(S/ 1 592.00/mes) PRI	
= 9.3 meses; equivalente a 10 meses.	

\* 1 USD tiene tipo de cambio de S/ 3.32, (10 agosto de 2018).

\*\* Se considera 50 % de rendimiento energético con el uso de GLP, al realizar las mejoras técnicas en el tanque de lavado en caliente.

Fuente: Elaboración Propia

A partir del análisis realizado, se concluye que la Oportunidad N°2 de PML es económicamente viable.

**Oportunidad N°3:** Reutilización de las aguas de enjuague de final de proceso en las tinas de flotación del siguiente turno.

**Tabla 4.23: Evaluación Económica de Oportunidad N°3 de PML**

<b>Inversión (S/)</b>	
1) Excavación y eliminación de desmonte .....	S/ 700.00
2) Construcción y vaciado en concreto armado de 10 cm de espesor, y pulido interior .....	S/ 1 600.00
3) Bomba centrífuga de 1.5 kW, tuberías de PVC, accesorios, tablero de control eléctrico e instalación.....	S/ 1 000.00
4) IGV (18 %). ....	S/ 724.00
<b>Total de Inversión</b>	<b>S/ 4 024.00</b>
<b>Ahorro mensual (S/)</b>	
1) Reducción por costo total de consumo de agua 250 m³ agua/ S/ 5.239/m³ agua.....	S/ 1 310.00 (SEDAPAL SA – Categoría Comercial)
2) Reducción por costo de descarga al alcantarillado 227 m³ aguas residuales/ S/ 2.365/m³ aguas residuales.....	S/ 537.00 (SEDAPAL SA – Categoría Comercial)
3) IGV (18 %). ....	S/ 405.00
<b>Total de Ahorro mensual</b>	<b>S/ 2 252.00</b>
<b>Período de Recuperación de la Inversión (PRI)</b>	
PRI = (Inversión)/(Ahorro mensual)	
PRI = (S/ 4 024.00)/(S/ 2 252.00/mes)	
PRI = 1.8 meses	
Se considera el período de recuperación de la inversión: 2 meses.	

Fuente: Elaboración propia

A partir, del análisis realizado se concluye que la Oportunidad N°3 de PML es económicamente viable.

**Oportunidad N°4:** Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios.

**Tabla 4.24: Evaluación Económica de Oportunidad N°4 de PML**

<b>Inversión (S/)</b>	
1) 3 Planchas de acero inoxidable perforada de 1.5 mm de orificios de 2.4mx1.2m.....	S/ 2 400.00
2) Servicio de corte, dobléz y plegado.....	S/ 600.00
3) Instalación (mano de obra).....	S/ 450.00
4) IGV (18 %)......	S/ 757.00
<b>Total de Inversión</b>	<b>S/ 4 207.00</b>
<b>Ahorro mensual (S/)</b>	
1) Reducción por costo total de residuo generado (sedimento) 4 521 kg de sedimento x 15% x S/ 1.30/kg de sedimento.....	S/ 882.00
2) Reducción por costo de disposición final de sedimento 4 521 kg de sedimento x 15% x S/ 70.00/1000 kg de sedimento..	S/ 47.00
3) IGV (18 %)......	S/ 204.00
<b>Total de Ahorro mensual</b>	<b>S/ 1 133.00</b>
<b>Período de Recuperación de la Inversión (PRI)</b>	
PRI = (Inversión)/(Ahorro mensual)	
PRI = (S/ 4 207.00)/(S/ 1 133.00/mes)	
PRI = 3.7 meses	
Se considera el período de recuperación de la inversión: 4 meses.	

Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis realizado, se concluye que la Oportunidad N°4 de PML es económicamente viable.

#### 4.3.3 Evaluación Ambiental

Para la evaluación ambiental se consideran: la reducción en la generación de residuos, efluentes y emisiones; así también, el ahorro en consumo de agua, energía eléctrica y ahorro de combustible; que se espera conseguir con la implementación de las oportunidades de Producción Más Limpia.

**Tabla 4.25: Resultados de la evaluación ambiental de las oportunidades de PML**

N°	Oportunidades de Producción Más Limpia	Criterios para cada oportunidad de PML						Mejora de Impacto Ambiental
		Reducción de residuos (kg/mes)	Reducción de efluentes (m3/mes)	Reducción de emisiones (kg/mes)	Ahorro de agua (m3/mes)	Ahorro de energía eléctrica (kWh/mes)	Ahorro de combustible (S/ /mes)	
1	Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E).	13	-	-	-	-	-	Significativo
2	Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP) y cambio de tecnología.	2 080	-	Se mejora en lo referente a SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub>	-	445	1 592 (10.8%)	Significativo
3	Reutilización de las aguas de enjuague de final del proceso en las tinas de flotación del siguiente turno.	-	227	-	250	-	-	Significativo
4	Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios.	678	-	-	-	-	-	Significativo

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4 Selección de Oportunidades Factibles

**Tabla 4.26: Resultados del estudio de factibilidad de las oportunidades de PML**

N°	Oportunidades de Producción Más Limpia	Factibilidad			Costo de Implementación (S/)
		Técnica	Económica	Ambiental	
1	Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E).	Factible	Factible	Factible	0
2	Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), y cambio de tecnología.	Factible	Factible	Factible	14 748.00
3	Reutilización de las aguas de enjuague de final del proceso en las tinas de flotación del siguiente turno.	Factible	Factible	Factible	4 024.00
4	Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios.	Factible	Factible	Factible	4 207.00
<b>TOTAL:</b>					<b>22 979.00</b>

\*Los costos incluyen IGV (18%).

Fuente: Elaboración propia

## **4.4 CUARTA ETAPA: IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS OPORTUNIDADES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**

### **4.4.1 Obtención de Fondos**

La inversión total requerida es de S/ 22 979.00 (soles) incluido IGV, la cual representa una cantidad medianamente accesible para ser solventada con recursos propios; por tal motivo, la empresa considera que no será necesaria un financiamiento externo. Además, de acuerdo al estudio de factibilidad económica se determinó que la implementación de las oportunidades de PML presentan un período de recuperación de la inversión de 10 meses, y una rentabilidad de S/ 22 316.00 (soles) incluido IGV en el primer año de implementación del programa de PML.

### **4.4.2 Implementación de las oportunidades factibles de Producción Más Limpia: Plan de acción**

“Los requisitos de implementación varían ampliamente según el tipo de oportunidad de PML. Para oportunidades de PML complejas, el trabajo de implementación consta de las siguientes etapas”:

- a) “Preparación detallada: selección de equipos, diseño de las modificaciones a las instalaciones, planificación del presupuesto para las inversiones requeridas”.
- b) “Planificación de la instalación: mano de obra, equipo de instalación, parada temporal de la línea de producción”.
- e) “Instalación del equipo mejorado o nuevo”.
- d) “Capacitación de los operarios”.
- e) “Puesta en marcha”.

De tal manera, las oportunidades factibles de Producción Más Limpia serán implementadas de acuerdo con el Plan de acción mostrado en la Tabla 4.27, las cuales requieren de un tiempo de 5 meses.



**Tabla 4.27: Plan de acción para la implementación de las oportunidades factibles de Producción Más Limpia**

N°	Oportunidades factibles de Producción Más Limpia	Responsable	Mes					Metas
			1	2	3	4	5	
1	Sustitución de detergente en el lavado en caliente; de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E).	EO						Mejora de la calidad del lavado del producto final y ahorro económico.
2	Sustitución de combustible; de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), y cambio de tecnología.	EE y EO						Reducción en la generación de cenizas y emisiones; y mejora del rendimiento energético.
3	Reutilización de las aguas de enjuague de final del proceso en las tinas de flotación del siguiente turno.	EE y EO						Reducción en el consumo de agua, y reducción en la generación de aguas residuales.
4	Cambio e instalación de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 a 1.5 mm de diámetro de orificios.	EO						Reducción en la generación de residuo sólido como sedimento.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- EE: Equipo estratégico, conformado por: Gerente General, Jefe de Planta y Jefe de control de Calidad.
- EO: Equipo operativo, conformado por: Jefe de Planta y Jefe de Mantenimiento.

#### **4.4.3 Supervisión y Evaluación del avance**

Se realizará una supervisión y evaluación de los avances que presenten cada una de las oportunidades de PML ya implementadas, con la finalidad de:

- Conseguir información sobre el impacto de la ejecución de las recomendaciones en el rendimiento de la empresa.
- Compartir información con las partes interesadas de la empresa.
- Entender mejor las barreras e incentivos que generan las decisiones de la empresa Compañía Ecológica GW SAC para asumir o ignorar las oportunidades de PML, lo que permitirá afinar las estrategias futuras en los diagnósticos de Producción Más Limpia.

En esta evaluación deben de considerarse los siguientes factores:

- Cambios en las cantidades generadas de residuos, efluentes y emisiones.
- Cambios en el consumo de recursos: materias primas, insumos, agua y energía.
- Cambios en la productividad.

“Al término de esta evaluación, se deberá recopilar y archivar la siguiente información para realizar un informe final a la empresa (Informe de Seguimiento), el cual debe contener lo siguiente”:

- “Lista de oportunidades de Producción Más Limpia recomendadas”.
- “Plan de acción para la implementación”.
- “Comparación de situaciones antes y después de implementadas las oportunidades de PML y evaluación de las mismas”.
- “Plan de acción a largo plazo de Producción Más Limpia”.

En la Tabla 4.28 se muestran las mejoras proyectadas de los indicadores de desempeño con la implementación del programa de PML en el proceso productivo de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.

**Tabla 4.28: Mejora de indicadores de desempeño con la implementación del programa de Producción Más Limpia**

<b>Indicadores de desempeño</b>	<b>Proceso Productivo</b>		<b>% de reducción</b>
	<b>Antes de implementar el programa de PML</b>	<b>Después de implementar el programa de PML</b>	
Productividad (TM rPET*/mes)	300.0	300.7	-
Consumo de agua (m <sup>3</sup> /TM rPET)	2.34	1.51	35.5 %
Generación de efluentes (m <sup>3</sup> /TM rPET)	2.30	1.46	36.5 %
Consumo de energía eléctrica (kWh/TM rPET)	136.2	134.4	1.3 %
Consumo de energía calorífica (kWh/TM rPET)	186.1	128.0	31.2 %
Pérdida de energía calorífica (kWh/TM rPET)	122.1	64.0	47.6 %
Generación de cenizas (kg/TM rPET)	6.93	0	100 %
Generación de residuo sólido: sedimento (kg/TM rPET)	40.15	37.80	5.9 %
Generación de residuos peligrosos: sacos vacíos de soda cáustica y detergente (kg/mes)	32.2	16.1	50 %

\*TM rPET: Tonelada métrica de hojuelas de PET reciclado.

Fuente: Elaboración propia

## **4.5 QUINTA ETAPA: MEJORA CONTINUA**

### **4.5.1 Mantenimiento de las actividades de Producción Más Limpia**

El Comité de Producción Más Limpia debe usar los éxitos logrados en la evaluación final de las oportunidades de PML implementadas, para motivar y respaldar ante el Directorio de la empresa la continuidad de las actividades del programa de PML para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo.

Asimismo, para dar continuidad a las actividades del programa de PML, se debe identificar problemas asociados a la implementación de las oportunidades factibles de PML, que no han sido resueltos, o mejoras que pueden ser introducidas en otras áreas de la planta. En este sentido, las actividades que pueden ser encaradas como parte de una siguiente fase del programa de PML, incluyen:

- “Operaciones unitarias que no fueron evaluadas en detalle”.
- “Las oportunidades de PML implementadas que no dieron resultados esperados”.
- “Otras actividades de planificación y desarrollo técnico de la empresa (mantenimiento, adquisición de nuevas máquinas, estudios de nuevos productos, y otros) que no formaron parte del diagnóstico de PML”.

El Comité de Producción Más Limpia debe considerar la posibilidad de desarrollar el programa de PML en el marco más amplio de la gestión ambiental de la empresa, que motive al Directorio de la empresa a crear un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) como parte del sistema global de gestión de la empresa, a fin de ampliar el alcance del programa de PML y permitir su mejora continua.

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A partir de los hallazgos encontrados, se acepta la hipótesis general que establece que la implementación de un programa de Producción Más Limpia en la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), contribuye en la mejora productiva y ambiental de la empresa Compañía Ecológica GW SAC.

En la Tabla 4.28 se muestra la mejora de indicadores de desempeño con la implementación del programa de Producción Más Limpia (PML); estos resultados guardan relación con lo que sostienen: Toledo Quintana (2013) en aplicación del programa de PML en la industria del reciclaje de envases PET post-consumo; Flores Galarza (2015) en implementación del programa de PML en la industria textil; Paredes Concepción (2014) en PML en la industria de harina y aceite de pescado; Mucching Vidal (2013) en aplicación de un programa de PML en la industria metal-mecánica; y Ricaldi Marcelo (2011) en PML en una planta de beneficio de ganado; quienes señalan los beneficios técnicos, económicos y ambientales de la implementación del programa de Producción Más Limpia en sus respectivas investigaciones; lo cual es acorde con lo que en este estudio se consigue.

Por un lado, mediante el empleo de las herramientas de Producción Más Limpia se establece la situación ambiental y económica de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, tales como rendimiento energético (34.4%) en el calentamiento del tanque de lavado utilizando carbón mineral (antracita), la cual se considera ineficiente; consumo excesivo de agua (2.35 m<sup>3</sup>/TM de rPET), al no aplicar técnicas de reutilización, y pérdida de material PET como sedimento de 4.1%, al no optimizar el proceso productivo en las etapas de centrifugado de prelavado, de enjuague y secado; para luego proponer oportunidades de Producción Más Limpia.

Por otro lado, se consigue generar 4 oportunidades de Producción Más Limpia que contribuirán con la mejora productiva y ambiental de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo; y se muestran en la Tabla 4.16, las cuales son: a) Sustitución de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E), b) Sustitución de combustible y cambio de tecnología de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), c) Reutilización de aguas de enjuague en la etapa de flotación, y d) Cambio de tamiz en las centrifugadoras de 2 mm a 1.5 mm de diámetro de orificios. Estas oportunidades de PML están asociadas a las estrategias de la Producción Más Limpia y requieren un tiempo de 5 meses para su implementación según el Plan de acción mostrado en la Tabla 4.27. Cabe mencionar que en la sustitución de combustible y cambio de tecnología de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP) en la operación de lavado en caliente, no se consideró al combustible Gas Natural (GN), debido a falta de habilitación e instalación de la Red de Gas Natural por la zona, inclinándose al uso de GLP en un tanque horizontal homologado de plancha de acero de 1892 litros de capacidad, que también es un combustible limpio y contribuirá con la mejora del desempeño ambiental y adecuación a la legislación ambiental vigente, reduciendo la generación de cenizas y emisiones. Para evaluar la mejora se requiere de la instalación de una chimenea y un monitoreo de emisiones de chimenea.

Además, la evaluación de la factibilidad técnica, económica y ambiental de las oportunidades de Producción Más Limpia propuestas para la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, las cuales se sintetizan en la Tabla 4.26, muestran la viabilidad del programa de PML, consiguiéndose beneficios como: un ahorro económico de 9.5% con la sustitución de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable Texapon-E; en lo que respecta a sustitución de combustible y cambio de tecnología, de carbón mineral (antracita) a GLP, un ahorro económico de 10.8%; con la reutilización del agua de enjuague en las tinas de flotación, una reducción en el consumo de agua de 35.5%; en lo que respecta al cambio de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 mm a 1.5 mm de diámetro de orificios, una reducción

en la generación de residuo sólido como sedimento de 5.9%. En este sentido, se mejorarán la situación ambiental y económica después de implementar el programa de PML, tales como: rendimiento energético de 50% en el calentamiento del tanque de lavado utilizando GLP; consumo de agua de 1.75 m<sup>3</sup>/TM de rPET; y pérdida de material PET como sedimento de 3.7%.

Finalmente, se determina que la inversión total para la implementación del programa de Producción Más Limpia asciende a S/ 22, 979.00 (soles) incluido IGV; la cual representa una cantidad medianamente accesible para ser solventada con recursos propios; por tal motivo, la empresa considera que no será necesaria un financiamiento externo. La implementación del programa de PML presenta un período de recuperación de la inversión de 10 meses y permitirá generar una rentabilidad de S/ 22, 316.00.00 (soles) incluido IGV en el primer año, la cual contribuirá con las ventajas competitivas de la empresa Compañía Ecológica GW SAC, por lo que se propone su implementación en un corto plazo.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES**

1. La implementación del programa de Producción Más Limpia en la planta de reciclaje mecánico de residuos de post-consumo: envases PET – Poli(Tereftalato de Etileno), de la empresa Compañía Ecológica GW SAC, sí es viable, y permitirá conseguir la mejora productiva y ambiental, por tal motivo, es prioritaria su ejecución en un corto plazo.
2. El empleo de las herramientas de Producción Más Limpia permitió establecer la situación ambiental y económica de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo, tales como rendimiento energético (34.4%) en la operación de calentamiento del tanque de lavado, consumo excesivo de agua (2.35 m<sup>3</sup>/TM de rPET) y pérdida de material PET como sedimento de 4.1%; para luego proponer oportunidades de Producción Más Limpia.
3. Se consiguió generar 4 oportunidades de Producción Más Limpia que contribuirán con la mejora productiva y ambiental de la planta de reciclaje mecánico de envases PET post-consumo; las cuales son: a) Sustitución de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable (Texapon-E), b) Sustitución de combustible y cambio de tecnología de carbón mineral (antracita) a Gas Licuado de Petróleo (GLP), c) Reutilización de aguas de enjuague en la etapa de flotación, y d) Cambio de tamiz en las centrifugadoras de 2 mm a 1.5 mm de diámetro de orificios. Estas oportunidades de PML requerirán de 5 meses para su implementación.
4. De acuerdo a la evaluación de factibilidad técnica, económica y ambiental de las 4 oportunidades de Producción Más Limpia propuestas se determinó la viabilidad de la implementación del programa de PML, donde se logrará un impacto positivo, tales como: un ahorro económico de 9.5%



con la sustitución de detergente en polvo a detergente líquido biodegradable Texapon-E; en lo que respecta a sustitución de combustible y cambio de tecnología, de carbón mineral (antracita) a GLP, un ahorro económico de 10.8%; con la reutilización del agua de enjuague en las tinas de flotación, una reducción en el consumo de agua de 35.5%; en lo que respecta al cambio de tamiz en las centrifugadoras de 2.0 mm a 1.5 mm de diámetro de orificios, una reducción en la generación de residuo sólido como sedimento de 5.9%; las cuales mejorarán los indicadores de desempeño.

5. La inversión total para la implementación del programa de Producción Más Limpia asciende a S/ 22, 979.00 (soles) incluido IGV; el cual será financiado por la misma empresa, con un período de recuperación de la inversión de 10 meses y permitirá generar una rentabilidad de S/ 22, 316.00.00 (soles) incluido IGV en el primer año.
6. Con la mejora del desempeño ambiental y económico, después de la implementación del programa de Producción Más Limpia, se espera contribuir en la mejora del rendimiento del personal y crear un entorno de trabajo más seguro y saludable; además, conseguir una adecuación a la legislación ambiental vigente.

## **CAPÍTULO VII**

### **RECOMENDACIONES**

1. Asegurar la capacitación y concientización del personal de la empresa acerca de los beneficios del programa de Producción Más Limpia para su implementación eficiente.
2. Considerar la implementación del programa de Producción Más Limpia para la planta de reciclaje de envases PET post-consumo como una alternativa prioritaria de mejora de la productividad y competitividad; asimismo, como una estrategia para la mejora del desempeño ambiental de la empresa.
3. Realizar periódicamente el monitoreo de generación de residuos (sedimento), efluentes y emisiones, para evaluar las mejoras esperadas con la implementación del programa de Producción Más Limpia.
4. Generar nuevas oportunidades de Producción Más Limpia y establecer la mejora continua; para garantizar y asegurar, a mediano plazo, la creación de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) en la empresa.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Toledo Quintana, Diether. (2013). *Aplicación de un programa de Producción Más Limpia en la empresa recicladora de PET del Grupo Pradera SAC*. Informe de Suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero Químico, FIQT - Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, pp. 12-14, 17.
- [2] Flores Galarza, Jhony D. (2015). *Implementación del programa de Producción Más Limpia en una planta de teñido y engomado de urdimbre Denim*. Informe de Suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero Textil, FIQT - Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, p. 122.
- [3] Paredes Concepción, Perla. (2014). *Producción Más Limpia y el manejo de efluentes en plantas de harina y aceite de pescado*. Revista de Investigación Industrial Data, vol. 17, núm. 2, julio-diciembre, 2014, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, pp. 72-80.
- [4] Guerra Huamán, H., & Saire Guerra, M. (2014). *Elaboración de un programa de Producción Más Limpia para la planta de conservas de recursos hidrobiológicos de Pacific Natural Foods SAC*. Trabajo de titulación para optar el título profesional de Ingeniero Pesquero, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú, pp. 100-101
- [5] Mucching Vidal, Glenney N. (2013). *Aplicación de un programa de implementación de Producción Más Limpia en el proceso de pintado en una empresa metalmecánica peruana*. Informe de Suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero Químico, FIQT - Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, pp. 127-128.
- [6] Carrasco Pazos, R., & Marticorena Cerrón, L. (2012). *Mejora de los procesos aplicando las herramientas de Producción Más Limpia en una*

*refinería de sal*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico, FIQT - Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, pp. 164-166.

- [7] Ricaldi Marcelo, Rolando A. (2011). *Identificación de mecanismos de Producción Más Limpia (PML) en el Centro de Beneficio Municipal de ganado en la provincia de Junín para mejorar las condiciones de calidad y medioambiente*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial, FICH - Universidad Nacional del Centro del Perú, Junín-Perú, pp. 110-111.
- [8] Ortega Acevedo, B., & Vitola Reyes, T. (2011). *Modernización de la planta de reciclaje de Polietileno Tereftalato de la empresa Polisuin SA acoplando un sistema de tratamiento de efluentes*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias-Colombia, pp. 11-12.
- [9] Billmeyer, F. (2015). *Ciencia de los polímeros*. Editorial Reverté SA, Barcelona-España, p. 4.
- [10] Hachi Quintana, J., & Rodríguez Mejía, J. (2010). *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de Polietileno Tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Industrial, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil-Ecuador, pp. 33-34.
- [11] Montecinos, J., Torrico, A., & Bueno, J. (2007). *Proyecto 11 – Reciclaje de PET*. Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz-Bolivia, pp. 4-7, 13.
- [12] López, C. (2016). *Reciclado del plástico PET para la obtención de fibra textil*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Industrial,

Facultad Regional Santa Cruz, Universidad Tecnológica Nacional, Santa Cruz-Argentina, pp. 12-13.

- [13] Rivera Távara, Raúl. (2004). *Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Industrial y de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Piura-Perú, pp. 29, 37-39.
- [14] Quintero Díaz, Laura A. (2016). *Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET)*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, pp. 16-17.
- [15] Europa Press. (2016). *Grupo AJE se compromete a reducir un 4% sus emisiones de gases de efecto invernadero*. 22/08/2016. Madrid-España. (En línea)  
<http://www.europapress.es/epsocial/responsables/noticia-grupo-aje-compromete-reducir-emisiones-gases-efecto-invernadero-201608221-15143.html> (Revisado: 5 de abril de 2018).
- [16] Beya, J., Goicochea, J., & Paan, C. (2016). *Reciclaje, la llave para la diversificación de los envases PET*. Entrevista realizada el 29/08/2016. El Comercio, Lima-Perú. (En línea) <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/reciclaje-llave-diversificacion-envases-pet-252737> (Revisado: 5 de abril de 2018).
- [17] Peruana de Moldeados SA – PAMOLSA. (2016). *Planta de reciclaje Recicloplas Perú*. Callao-Perú. (En línea)  
<http://www.pamolsa.com.pe/compromiso-ambiental> (Revisado: 6 de abril de 2018).
- [18] Gexim SAC. (2017). *Fibra de poliéster RPET*. Lima-Perú. (En línea)  
<http://www.gexim.com.pe/nosotros> (Revisado: 6 de abril de 2018).

- [19] Ecología y Compromiso Empresarial, A.C. de México – ECOCE. (2017). *Informe ECOCE 2017*. Ciudad de México-México. (En línea) <http://eco-ce.mx/files/Informe-ECOCE-2017.pdf> (Revisado: 6 de abril de 2018).
- [20] La Nación. (2016). *6 gráficos para entender el problema del plástico*. 19/12/2016. Buenos Aires-Argentina. (En línea) <https://www.lanacion.com.ar/1968639-6-graficos-para-entender-el-problema-del-plastico> (Revisado: 6 de abril de 2018).
- [21] Askeland, D., Pradeep, P., & Wendelin, J. (2011). *Ciencia e ingeniería de materiales*. 6.ª edición, Edamsa Impresiones, México, pp. 601-604.
- [22] Tonelli, M. (2013). *Sistema de Codificación de los materiales plásticos*. ECOPLAS, Centro de Información Técnica – CIT, Buenos Aires-Argentina. (En línea) <http://ecoplas.org.ar/pdf/42.pdf> (Revisado: 6 de abril de 2018).
- [23] INDECOPI. (2007). *Guía Peruana GP 900.200:2007 – Guía para la implementación de Producción Más Limpia*. 1.ª edición, Lima-Perú, pp. 6-9, 11-38.
- [24] Hoof, B., Monroy, N., & Saer, A. (2008). *Producción Más Limpia – Paradigma de gestión ambiental*. 1.ª edición, Editorial Alfaomega, Bogotá-Colombia, pp. 57-62, 130-140.
- [25] Congreso de la República. (2005). *Ley N°28611 – Ley General del Ambiente*. 13/10/2005, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea) <http://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-ambiente> (Revisado: 25 de abril de 2018).
- [26] Ministerio del Ambiente–MINAM y Presidencia del Consejo de Ministros-PCM. (2016). *Decreto Legislativo N°1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. 23/12/2016, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú.

(En línea) <http://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-gestion-integral-residuos-solidos> (Revisado: 25 de abril de 2018).

- [27] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento – M-VIVIENDA. (2015). *Decreto Supremo N° 001-2015-VIVIENDA – Modifica diversos artículos del Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA, que aprobó los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario así como de su Reglamento*. 10/01/2015, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea)  
<http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/documentos/DS-001-2015-VIVIENDA.pdf> (Revisado: 26 de abril de 2018).
- [28] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento – M-VIVIENDA. (2009). *Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA – Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario*. 20/11/2009, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea)  
<http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/documentos/DS-001-2015-VIVIENDA.pdf> (Revisado: 26 de abril de 2018).
- [29] Ministerio del Ambiente - MINAM. (2017). *Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM – Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire*. 07/06/2017, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea)  
<http://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones> (Revisado: 28 de abril de 2018).
- [30] Ministerio del Ambiente - MINAM. (2017). *Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM – Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. 02/12/2017, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea)  
<http://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0> (Revisado: 28 de abril de 2018).

- [31] Presidencia del Consejo de Ministros - PCM. (2003). *Decreto Supremo N°085-2003-PCM – Aprueban el Reglamento de Estándares Nacionales de calidad Ambiental para Ruido*. 30/10/2003, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea) <http://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-estandares-nacionales-calidad-ambiental-ruido> (Revisado: 28 de abril de 2018).
- [32] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo - MTPE. (2012). *Decreto Supremo N° 005-2012-TR - Reglamento de la Ley N° 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo*. 25/04/2012, Diario Oficial El Peruano, Lima-Perú. (En línea) [http://www.mintra.gob.pe/archivos/file/SNIL/normas/2012-04-25\\_005-2012-TR\\_2254.pdf](http://www.mintra.gob.pe/archivos/file/SNIL/normas/2012-04-25_005-2012-TR_2254.pdf) (Revisado: 28 de abril de 2018).
- [33] Tokeshi Shirota, Alberto. (2013). *Planifique, desarrolle y apruebe su tesis: guía para mejores resultados*. 2.a edición, Fondo Editorial – Universidad de Lima, Lima-Perú, pp. 37-44.
- [34] BEIER Machinery Co., Ltd. (2018). *PET bottle washing line*. (En línea) <http://www.beierpm.com> (Revisado: 3 de mayo de 2018).
- [35] Compañía Recicladora SA – CORESA. (2015). *Reciclaje integral de envases PET post-consumo*. Asunción-Paraguay. (En línea) <http://www.coresa.com.py/index.php/es/productos/> (Revisado: 3 de mayo de 2018).
- [36] Suzhou Zhongsu Reprocessing Machinery Co., Ltd. (2011). *Waste plastic recycling and reprocessing*. (En línea) <http://www.zsmachine.com> (Revisado: 3 de mayo de 2018).
- [37] Pagani Dycomet SA. (2017). *Sistemas de reciclaje de PET*. (En línea) <http://www.pagani.com.mx/es/sistemas-de-lavado/List/show/sistemas-de-reciclaje-de-pet-156> (Revisado: 10 de mayo de 2018).



- [38] Giraldo, P., & Blas, W. (2007). *Minería actual del carbón en el norte del Perú*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, vol. 10, núm. 20, 2007, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, pp. 76-81.

## ANEXOS

### Anexo A: Potencia requerida por las operaciones unitarias del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo (PET cristal)

Operaciones Unitarias	Máquinas / Equipos	I (A)	V (V)	fp	$P_{real}(kW) = \frac{I(A) \cdot V(V) \cdot (\sqrt{3}) \cdot fp}{1000}$	P <sub>nominal</sub> (kW)
Selección primaria	Faja transportadora	3.7	220	0.8	1.13	1.50
Separación Trommel	Separador Trommel	5.6	220	0.8	1.71	2.25
Selección secundaria	Faja transportadora	3.7	220	0.8	1.13	1.50
Molienda	Molino de cuchillas N°1	65.0	220	0.8	19.8	22.5
	Molino de cuchillas N°2	65.0	220	0.8	19.8	22.5
	Transportador sinfín	3.7	220	0.8	1.13	1.50
	Extractor de aire	11.2	220	0.8	3.41	4.50
Prelavado	Alimentador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Bomba de recirculación	3.7	220	0.8	1.13	1.50
	Transportador de escurrimiento	3.7	220	0.8	1.13	1.50
Flotación	Tina de flotación N°1	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Transportador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Rodillos de limpieza	3.4	220	0.8	1.04	1.50
	Colector de flotables	1.6	220	0.8	0.49	0.75
	Bomba de recirculación	1.8	220	0.8	0.55	0.75
	Tina de flotación N°2	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Transportador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Bomba de recirculación	1.8	220	0.8	0.55	0.75
Centrifugado de prelavado	Centrifugadora	18.0	220	0.8	5.50	7.50
	Transportador sinfín	3.7	220	0.8	1.13	1.50
Lavado en caliente	Tanque de lavado	28.0	220	0.8	8.54	11.25
	Transportador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Bomba de recirculación	1.8	220	0.8	0.55	0.75
	Soplador turbo	3.5	220	0.8	1.07	1.50
Lavado por fricción	Lavadora por fricción	15.0	220	0.8	4.57	7.50

(...continúa)

(...continuación)

**Anexo A: Potencia requerida por las operaciones unitarias del Proceso de Reciclaje Mecánico de envases PET post-consumo (PET cristal)**

Operaciones Unitarias	Máquinas / Equipos	I (A)	V (V)	fp	$P_{real}(kW) = \frac{I(A) \cdot V(V) \cdot (\sqrt{3}) \cdot fp}{1000}$	P <sub>nominal</sub> (kW)
Centrifugado de enjuague	Centrifugadora	18.0	220	0.8	5.50	7.50
	Transportador sinfín	3.7	220	0.8	1.13	1.50
Enjuague	Tina de enjuague N°1	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Transportador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Bomba de recirculación	1.8	220	0.8	0.55	0.75
	Tina de enjuague N°2	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Transportador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Bomba de recirculación	1.8	220	0.8	0.55	0.75
Centrifugado de secado	Centrifugadora	18.0	220	0.8	5.49	7.50
Escogido manual	Faja transportadora	3.7	220	0.8	1.13	1.50
Remolienda	Alimentador sinfín	5.6	220	0.8	1.71	2.25
	Molino de cuchillas N°3	53.0	220	0.8	16.16	22.50
	Ciclón	11.2	220	0.8	3.41	4.50
Envasado	-	-	-	-	-	-
<b>Total (kW)</b>					127.0	164.0

Fuente: Elaboración propia

## Anexo B: Certificado de Análisis de Aguas Residuales después de Tratamiento Primario descargadas al alcantarillado (Línea completa)



### Información General

Matriz: Agua

Solicitud de Análisis: Cotización N° 37913 (Jun-105)

Muestreado por: Cliente

Procedencia: Compañía Ecológica GW S.A.C.

Referencia: Línea de Lavado de Hojuelas PET (Post-Consumo)

Identificación de Laboratorio:	S-0001499530
Tipo de Muestra:	Agua Residual no Doméstica
Identificación de Muestra:	Agua Residual Tratada, descargada al alcantarillado (Línea Completa)
Fecha y Hora de Muestreo:	2018-06-07 07:30
Fecha de Recepción de la Muestra:	2018-06-08
Fecha de Inicio de análisis:	2018-06-08

Análisis	Resultado	Unidad
<b>Química</b>		
*pH. Agua. EPA 150.1 600/4-79-020, Revised March 1983. pH (Electrometric)		
pH	11,0	
Aceites y Grasas. Agua. EPA Method 1664, Revisión B. 2010. N-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated N-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non Polar Material) by Extraction and Gravimetry		
Aceites y Grasas (1L)	14	mg/L
DBO <sub>5</sub> . Agua. EPA Method 405.1 600/4-79-020 Revised March. 1983. Biochemical Oxygen Demand (5 Days, 20°C)		
DBO <sub>5</sub>	283	mg/L
DQO. Agua. EPA Method 410.1 600/4-79-020 Revised March. 1983. Chemical Oxygen Demand (Titrimetric, Mid - Level)		
DQO	517	mg/L
Sólidos Totales en Suspensión. Agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D, 23rd Ed. 2017. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103 - 105°C		
Sólidos Totales en Suspensión	125	mg/L

### Nota(s) del Informe Final:

pH: Resultado referencial, la medición no fue realizada en el muestreo. El ensayo queda fuera del alcance de acreditación.

Fuente: Compañía Ecológica GW SAC.

## Anexo C: Certificado de Análisis de Aguas Residuales después de Tratamiento Primario descargadas al alcantarillado (Línea completa sin incluir las aguas de tinas de enjuague)



### Información General

Matriz: Agua  
Solicitud de Análisis: Cotización N° 37913 (Jun-106)  
Muestreado por: Cliente  
Procedencia: Compañía Ecológica GW S.A.C.  
Referencia: Línea de Lavado de Hojuelas PET (Post-Consumo)

Identificación de Laboratorio: S-0001499531  
Tipo de Muestra: Agua Residual no Doméstica  
Identificación de Muestra: Agua Residual Tratada, descargada al alcantarillado (Línea Completa sin incluir 2 tinas de enjuague)  
Fecha y Hora de Muestreo: 2018-06-08 07:30  
Fecha de Recepción de la Muestra: 2018-06-08  
Fecha de Inicio de análisis: 2018-06-08

Análisis	Resultado	Unidad
<b>Química</b>		
*pH. Agua. EPA 150.1 600/4-79-020, Revised March 1983. pH (Electrometric)		
pH	12,5	
Aceites y Grasas. Agua. EPA Method 1664, Revisión B, 2010. N-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated N-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non Polar Material) by Extraction and Gravimetry		
Aceites y Grasas (1L)	N.C.( $<5$ )	mg/L
DBO5. Agua. EPA Method 405.1 600/4-79-020 Revised March. 1983. Biochemical Oxygen Demand (5 Days, 20°C)		
DBO5	360	mg/L
DQO. Agua. EPA Method 410.1 600/4-79-020 Revised March. 1983. Chemical Oxygen Demand (Titrimetric, Mid - Level)		
DQO	837	mg/L
Sólidos Totales en Suspensión. Agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D, 23rd Ed. 2017. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103 - 105°C		
Sólidos Totales en Suspensión	188	mg/L

### Notas de Ensayo:

N.C.: Significa que el resultado es No Cuantificable y es menor al Límite de Cuantificación indicado en el paréntesis.

### Nota(s) del Informe Final:

pH: Resultado referencial, la medición no fue realizada en el muestreo. El ensayo queda fuera del alcance de acreditación.

Fuente: Compañía Ecológica GW SAC.

## Anexo D: Certificado de Análisis de sedimento (PET refinado, arenilla y suciedad) de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado



### Información General

Matriz: Sedimento  
Solicitud de Análisis: Cotización N° 37913 (Jun-083)  
Muestreado por: Cliente  
Procedencia: Compañía Ecológica GW S.A.C.  
Referencia: Línea de Lavado de Hojuelas PET (Post-consumo)

Identificación de Laboratorio: S-0001499431  
Tipo de Muestra: Sedimento  
Identificación de Muestra: Residuo Sólido Sedimento  
Fecha y Hora de Muestreo: 2018-06-06 10:30  
Fecha de Recepción de la Muestra: 2018-06-07  
Fecha de Inicio de análisis: 2018-06-07

Análisis	Resultado	Unidad
<b>Química</b>		
* Sulfuros en Suelo: SCS U.S. 8A Revised 1986/SM 4500 S-2 D 2nd Ed 2012		
Sulfuros	N.C. (<0.02)	mg/Kg
* TCLP: Suelo. EPA 1311, Revised 0 July 1992. Toxicity Characteristic Leaching Procedure		
Arsénico	N.C. (<0.002)	mg/L
Bario	0.150	mg/L
Cadmio	0.006	mg/L
Cromo	0.050	mg/L
Mercurio	N.C. (<0.000 1)	mg/L
Plomo	0.166	mg/L
Selenio	N.C. (<0.002)	mg/L
* VOC's: Agua. EPA 8260-C. Revised 3, August 2006. Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography /Mass Spectrometry (GC/MS)		
Cloruro de vinilo	N.C. (<0.000 22)	mg/L
1,1-Dicloroetano	N.C. (<0.000 21)	mg/L
Acetonitrilo	N.C. (<0.000 21)	mg/L
Trans -1,2-Dicloroetano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
1,1-Dicloroetano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
2,2-Dicloropropano	N.C. (<0.000 22)	mg/L
cis-1,2-Dicloroetano	N.C. (<0.000 21)	mg/L
Bromodlorometano	N.C. (<0.000 22)	mg/L
1,1,1-Tricloroetano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
Tetracloruro de carbono	N.C. (<0.000 2)	mg/L
1,1-Dicloropropeno	N.C. (<0.000 21)	mg/L
1,2-Dicloroetano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
Tricloroetano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
1,2-Dicloropropeno	N.C. (<0.000 21)	mg/L
Dibromometano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
cis-1,3-Dicloropropeno	N.C. (<0.000 21)	mg/L
trans-1,3-Dicloropropeno	N.C. (<0.000 2)	mg/L
1,1,2-Tricloroetano	N.C. (<0.000 22)	mg/L
Tetracloroetano	N.C. (<0.000 27)	mg/L
1,3-Dicloropropeno	N.C. (<0.000 2)	mg/L
1,2-Dibrometano	N.C. (<0.000 2)	mg/L
Clorobenceno	N.C. (<0.000 2)	mg/L

(...continúa)



(...continuación)

**Anexo D: Certificado de Análisis de sedimento (PET refinado, arenilla y suciedad) de la Línea de Lavado de hojuelas de PET reciclado**



Análisis	Resultado	Unidad
<b>Química ( Continúa... )</b>		
1,1,1,2 Tetracloroetano	N.C.(<0,000 2)	mg/L
Estireno	N.C.(<0,000 21)	mg/L
Isopropilbenceno ( cumeno)	N.C.(<0,000 21)	mg/L
1,1,2,2 Tetracloroetano	N.C.(<0,000 21)	mg/L
Bromobenceno	N.C.(<0,000 2)	mg/L
1,2,3 Tricloropropano	N.C.(<0,000 2)	mg/L
n-Propilbenceno	N.C.(<0,000 2)	mg/L
2-Clorotolueno	N.C.(<0,000 21)	mg/L
1,3,5-Trimethylbenzene	N.C.(<0,000 21)	mg/L
4-Chlorotoluene	N.C.(<0,000 21)	mg/L
tert-Butylbenzene	N.C.(<0,000 21)	mg/L
1,2,4-Trimethylbenzene	0,000 62	mg/L
sec-Butylbenzene	N.C.(<0,000 21)	mg/L
p-Isopropyltoluene	N.C.(<0,000 2)	mg/L
1,3-Diclorobenceno	N.C.(<0,000 21)	mg/L
1,4-Diclorobenceno	N.C.(<0,000 21)	mg/L
n-Butylbenzene	N.C.(<0,000 2)	mg/L
1,2-Diclorobenceno	N.C.(<0,000 22)	mg/L
1,2-Dibromo-3-cloropropano	N.C.(<0,000 23)	mg/L
1,2,4-Triclorobenceno	N.C.(<0,000 2)	mg/L
Hexaclorobutadieno	N.C.(<0,000 2)	mg/L
Naftaleno	N.C.(<0,000 21)	mg/L
1,2,3-Triclorobenceno	N.C.(<0,000 2)	mg/L
pH en Suelo, Sedimentos y Lodos. EPA Method 9045 D, Rev. November 1986		
pH	11	

**Notas de Ensayo:**

N.C.: Significa que el resultado es No Cuantificable y es menor al Límite de Cuantificación indicado en el paréntesis.

**Nota(s) del Informe Final:**

VOC's: Resultado referencial por envase inadecuado.

Fuente: Compañía Ecológica GW SAC.

### Anexo E: Precios de compra de materia prima

<b>Materiales</b>	<b>Precio (S/ /kg)</b>
Envases PET a granel	1.00
Envases PET prensado	1.20
Hojuelas de PET cristal	1.50
Hojuelas de PET celeste	1.50
Hojuelas de PET azul	1.30
Hojuelas de PET verde	1.30
Hojuelas de PET marrón	1.15
Hojuelas de PET (aceite)	1.40

\* Los precios no incluyen IGV (18.0%), y corresponden al mes de agosto de 2018.

\*\* Los precios están referidos al material puesto en planta.

Fuente: Compañía Ecológica GW SAC.

### Anexo F: Precios de venta de producto terminado

<b>Productos y subproductos</b>	<b>Precio (S/ /kg)</b>
Hojuelas de rPET cristal (Calidad Estándar)	1.70
Hojuelas de rPET cristal (Calidad Superior)	1.80
Hojuelas de rPET celeste	1.70
Hojuelas de rPET azul	1.50
Hojuelas de rPET verde	1.50
Hojuelas de rPET marrón	1.30
Hojuelas de rPET (aceite)	1.60
Hojuelas de PP (tapitas) reciclado	1.10
Hojuelas de PEBD (etiquetas) reciclado	0.50

\* Los precios no incluyen IGV (18.0%), y corresponden al mes de agosto de 2018.

\*\* Los precios están referidos a Ex-works; es decir, en el almacén de la empresa Compañía Ecológica GW SAC.

Fuente: Compañía Ecológica GW SAC.



**Anexo G: Especificaciones técnicas de calidad del producto terminado  
(hojuelas de PET reciclado - Cristal)**

<b>Propiedades / Características</b>	<b>Tipo de calidad</b>	
	<b>Estándar</b>	<b>Superior</b>
Viscosidad intrínseca	0.72 – 0.76 dl/g	0.72 – 0.76 dl/g
Temperatura de fusión	252 °C	252 °C
Humedad	1.0 % máx.	1.0 % máx.
Densidad aparente	350 – 450 kg/m <sup>3</sup>	350 – 450 kg/m <sup>3</sup>
Tamaño de hojuela	3 – 12 mm	3 – 12 mm
Espesor de hojuela	3 mm	3 mm
Fracción de 1 – 3 mm	8.0 % máx.	8.0 % máx.
Fracción menor a 1.0 mm	1.0 % máx.	1.0 % máx.
Hojuela PVC	150 ppm	50 ppm
Hojuela PET celeste	5 % máx.	3 % máx.
Hojuela PET amarillento	300 ppm	200 ppm
Hojuela PET colores	200 ppm	150 ppm
Hojuela PET con etiqueta pegada	100 ppm	50 ppm
Hojuela de etiqueta libre	50 ppm	20 ppm
Metal	50 ppm máx.	10 ppm máx.

Fuente: Compañía Ecológica GW SAC.